

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

SROVNÁNÍ TECHNOLOGIE NÍZKOTLAKÉHO LITÍ S TECHNOLOGIÍ NÍZKOTLAKÉHO LITÍ S PROTITLAKEM

COUNTER-PRESSURE DIE CASTING COMPARED TO LOW PRESSURE DIE
CASTING

Fakulta:	Fakulta materiálově-technologická
Program:	Metalurgické inženýrství
Obor:	Slévárenské technologie
Vedoucí:	doc. Ing. Petr Lichý, Ph.D.
Jméno autora:	Dominik Tomášek
Rok odevzdání:	2021

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Petr Lichému, Ph.D. za odborné vedení práce a Martinu Máchovi za konzultace a poskytnuté informace potřebné při zpracování diplomové práce. V další řadě děkuji vedení firmy za poskytnutí této příležitosti a veškerého potřebného vybavení, kolegům z chemické laboratoře a jednomu NDT specialistovi, kteří mi předali mnohé cenné rady a byli mi nápomocní a nakonec mým nejbližším za nekonečnou psychickou podporu.

Diplomová práce vznikla za finanční podpory projektů „Studentské grantové soutěže“ čísel SP2021/39 a SP2021/41.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá srovnáním konvenční technologie nízkotlakého lití se speciální metodou nízkotlakého lití s protitlakem. Práce je rozdělena na dvě hlavní části: teoretickou a experimentální. Teoretická část popisuje základní vlastnosti slitin hliníku, se zaměřením na slitinu AlSi7Mg0,3 , ze které je porovnáván odlitek vyroben, její hlavní legující prvky a jejich účinky. Dále práce popisuje principy jak technologie nízkotlakého lití, tak lití s protitlakem, některé vady odlitků vyrobených pomocí obou technologií a způsoby jejich odhalení. Experimentální část je zaměřena na porovnávání kvality odlitků vyrobených těmito technologiemi. Porovnávání je provedeno na základě vyhodnocení mechanických, mikrostrukturálních vlastností, chemické analýzy a nedestruktivních zkoušek popsaných v teoretické části.

Klíčová slova

Technologie nízkotlakého lití, technologie nízkotlakého lití s protitlakem, slitiny hliníku, vady odlitků

Abstract

This thesis focuses on the comparison of conventional low-pressure die casting to the special method of counter-pressure die casting. The thesis consists two main parts: theoretical and experimental. The theoretical part describes the properties of aluminum compounds, with focus on the AlSi7Mg0.3 , which the compared casting is made of, its main alloying elements and their effects. Furthermore, the work describes the principles of both low-pressure casting and counter-pressure casting, some defects in castings produced using both technologies and ways to detect them. The experimental part is focused on comparing the quality of castings produced by the two technologies. The comparison is proven on the basis of evaluation of mechanical, microstructural properties, chemical analyzes and non-destructive testing described in the theoretical part.

Key words

Low-pressure die casting technology, counter pressure die casting, aluminum alloys, castings defects

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Teoretická část.....	2
2.1. Slévárenské slitiny hliníku, hlavní legující prvky	2
2.1.1. Slitiny Al-Si.....	3
2.1.2. Slitiny Al-Ti	5
2.1.3. Slitiny Al-Sr	7
2.1.4. Slitiny Al-Mg	8
2.1.5. Slitiny Al-Si-Mg.....	8
2.2. Mikrostrukturální vlastnosti slitin hliníku	11
2.2.1. Tuhnutí primární fáze $\alpha(\text{Al})$	11
2.2.2. Modifikace a očkování.....	17
2.3. Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin.....	18
2.3.1. Precipitační zpevnění – vytvrzování.....	18
2.4. Charakteristika technologie nízkotlakého lití (LPDC)	21
2.5. Charakteristika technologie nízkotlakého lití s protitlakem (CPDC)	23
2.5.1. Procesní modelování	24
2.5.2. Popis procesu CPDC	26
2.6. Běžné vady odlitků litých technologií LPDC / CPDC	38
2.6.1. Bubliny	38
2.6.2. Staženiny	41
2.6.3. Trhliny a praskliny	45
2.6.4. Vady mikrostruktury.....	47
2.6.5. Vady chemického složení a vlastností odlitků	49
2.7. Testování vlastností a kvality	50
2.7.1. Nedestruktivní testování.....	50
2.7.2. Destruktivní testování.....	53
3. Experimentální část	56
3.1. Specifikace porovnávané součásti	56
3.2. Vyhodnocení naplynění taveniny:.....	57
3.3. Vyhodnocení nedestruktivních zkoušek.....	59
3.3.1. Rentgenová zkouška	59
3.3.2. Fluorescenční zkouška.....	61
3.4. Vyhodnocení mechanických zkoušek	62
3.4.1. Zkouška tvrdosti	62
3.4.2. Zkouška tahem	64
3.5. Vyhodnocení analýzy mikrostrukturálních vlastností.....	67

3.5.1. Metodika přípravy vzorků	67
3.5.2. Vzdálenost sekundárních os dendritů (SDAS)	69
3.5.3. Stupeň modifikace	71
3.5.4. Velikost zrna	72
3.6. Vyhodnocení chemické analýzy	74
3.7. Závěr	75

1. Úvod

Mezi inovativními a konvenčními slévárenskými procesy pro slitiny hliníku se nízkotlaké lití (low pressure die casting - LPDC) vyznačuje několika výhodami, včetně vysokého využití tekutého kovu, vynikající kontroly provozních parametrů, dobré metalurgické a technologické kvality.

Technologie lití s protitlakem (counter pressure die casting - CPDC) používá podobné polohování formy a uzavřené pece jako technologie nízkotlakého lití s rozdílem v konečném způsobu tlakování. Využití tekutého kovu je velmi vysoké, často přesahuje i 95 %.

Odlitek porovnávaný touto prací je těhlice: část nápravy automobilu a s ním i podvozek, který zásadním způsobem ovlivňuje jízdní vlastnosti vozidla. K těhlici jsou připevněna ramena přední a zadní nápravy, pružící a tlumící jednotky, hnací tyče, vozidlová kola, brzdové soustavy a především tyče řízení.

Důvodem pro výběr tématu je, že technologii CPDC využívá pro výrobu v době psaní této práce jediná firma v České republice a není proto o této technologii lití dostupných mnoho informací v českém jazyce.

Cílem práce je srovnání vlivu dodatečného tlaku technologie CPDC oproti LPDC na vadách odlitků odlitých jednou i druhou technologií, a to prostřednictvím vyhodnocení destruktivních i nedestruktivních zkoušek. Práce poskytne shrnutí charakteristik obou procesů, jejich výhody i nevýhody, a to hlavně po stránce technologické. Ekonomické aspekty nebudou v této práci zohledněny.

K dosažení těchto cílů jsou v teoretické části popsány vlastnosti materiálu použitého pro odlitky porovnávané v experimentální části, principy obou porovnávaných technologií, nejběžnější vady vyskytující se u obou popsaných technologií a důvod jejich vzniku pro lepší vysvětlení možného vlivu různého způsobu tlakování u obou technologií.

2. Teoretická část

Teoretická část práce je rešeršní částí problematiky a jejím cílem je uvedení základních poznatků potřebných pro experimentální část této práce. Kapitola 2.1 popisuje slévárenské slitiny hliníku, které se běžně používají pro slévárenské technologie LPDC / CPDC, jejich základní vlastnosti, rozdělení a jednotlivé kapitoly 2.1.1-2.1.4 pak popisují hlavní legující prvky a jejich účinky. Kapitola 2.1.5 se detailněji zaměřuje na slitiny Al-Si-Mg a konkrétně na slitinu AlSi7Mg0,3, ze které je vyrobený odlitek vybraný pro experimentální část této diplomové práce. V kapitole 2.3 je vysvětlen proces tuhnutí slitin hliníku a parametr SDAS, který je jízdním z hlavních ukazatelů pro vyhodnocení kvality mikrostruktury obou srovnávaných technologií. Kapitola 2.4 stručně popisuje technologii nízkotlakého lití slitin hliníku do kovových forem. Kapitola 2.5 popisuje už podrobně kompletní výrobní proces technologie lití s protitlakem. V kapitole 2.6 jsou popsány nejčastěji se vyskytující slévárenské vady odlitků ze slitin hliníku vyráběných oběma technologiemi, a poslední kapitole teoretické části 2.7 jsou popsány metody detekce těchto vad.

2.1. Slévárenské slitiny hliníku, hlavní legující prvky

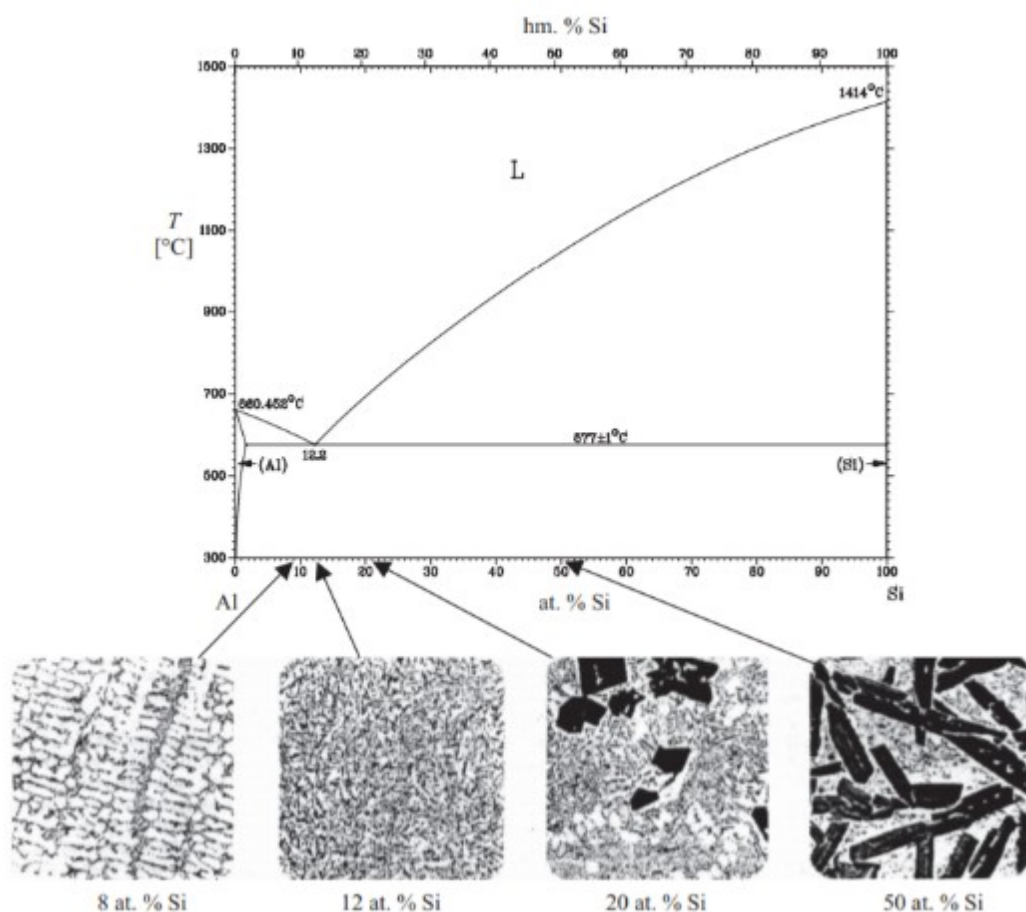
Hliník je kov, který patří do skupiny neželezných kovů a z hlediska morfologie krystalizuje v plošně centrované krystalické mřížce. Čistý hliník má nízkou hustotu ($2699 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), i relativně nízkou teplotu tání 660°C . Ze slévárenského pohledu je také významná poměrně vysoká měrná tepelná kapacita hliníku ($0.9 \text{ kJ}\cdot\text{kg}\cdot\text{K}^{-1}$) a vysoké skupenské teplo tání ($395 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$). Z těchto vysokých hodnot vyplývá značná energetická náročnost tavby hliníkových slitin. Hliník vyrobený hutním způsobem má čistotu až 99,9 % a vždy obsahuje nečistoty z prvovýroby (Fe, Si, Cu, Mg, atd.). Čistý hliník se vyznačuje nízkou hodnotou pevnosti, kdy mez pevnosti dosahuje cca 100 MPa, tvrdostí HB 40, špatnou obrobitelností a velmi špatnou slévatelností. Proto je vhodnější pro slévárenské zpracování používat jeho slitiny. Slévárenské slitiny hliníku lze rozdělit na vytvrditelné a nevytvrditelné. Vytvrditelné slitiny obsahují přísadové prvky, které vytváří tzv. intermetalické fáze (Mg_2Si , Al_2Cu), které umožňují tepelné zpracování odlitků – vytvrzování. [1, 2, 3]

Tab. (2.1). 1 - Značení slitin hliníku dle ČSN EN 1706 [3]

Skupina slitin	Číselné označení	Označení chemickými značkami
AlCu	EN AC-21xxx	EN AC-Al Cu4
AlSiMgTi	EN AC-41000	EN AC-Al Si2MgTi
AlSi7Mg	EN AC-42xxx	EN AC-Al Si7Mg0.3(0.6)
AlSi10Mg	EN AC-43xxx	EN AC-Al Si10(9)Mg
AlSi	EN AC-44xxx	EN AC-Al
AlSi5Cu	EN AC-45xxx	EN AC-Al
AlSi9Cu	EN AC-46xxx	EN AC-Al
AlSi(Cu)	EN AC-47xxx	EN AC-Al
AlSiCuNiMg	EN AC-48000	EN AC-Al
AlMg	EN AC-51xxx	EN AC-Al
AlZnMg	EN AC-71000	EN AC-Al

2.1.1. Slitiny Al-Si

Průmyslový význam slitin Al – Si je podmíněn jejich vysokou zabíhavostí, nízkým sklonem k tvorbě staženin při lití a možnostmi svařování a pájení. Tuhé částice křemíku zvyšují odolnost proti otěru. Slitiny Al – Si patří mezi nejdůležitější komerční slitiny s malými přísadami (0,01 %) Na nebo Sr. Tyto „modifikované“ slitiny značně zlepšují mikrostrukturu (zjemnění částic Si v podeutektických slitinách) a mechanické vlastnosti binárních slitin. Analogicky může být použit i fosfor (<0,01 hm. %) jako modifikující přísada v nadeutektických slitinách. Do slitin Al – Si mohou být přidávány také Cu nebo Mg za účelem vytvrzování stárnutím. [1]



Obr. (2.1). 1 - Rovnovážný diagram Al-Si [1]

Na Obrázku 2.1.1 je uveden fázový diagram binárního systému hliník – křemík, který v průběhu let nedoznal prakticky žádných změn. Al – Si je jednoduchý eutektický systém se dvěma tuhými roztoky, KPC (Al) a diamantovým kubickým (Si). Eutektická reakce probíhá při teplotě $577 \pm 1^{\circ}\text{C}$ a složení $12.2 \pm 0.1\%$ Si za vzniku tuhého roztoku (Al) 1.5 % Si a (Si) $\sim 100\%$ Si. Maximální rovnovážná rozpustnost Si v Al je $1.5 \pm 0.1\%$ při eutektické teplotě a snižuje se na 0,05 % Si při 300°C . [1]

Rozpustnost Si v (Al) může být značně rozšířena použitím rychlé solidifikace taveniny Al. Bylo dosaženo maximální rozpustnosti $11 \pm 1\%$ Si v tuhém roztoku (Al), což bylo zjištěno na nejtenčích, a proto nejrychleji ochlazovaných částech vzorků. [1]

Křemík má v hliníku velmi špatnou rozpustnost. Při eutektické teplotě je rozpustnost křemíku přibližně 1,65 % a při teplotě 300 °C je rozpustnost křemíku jen 0,22 %. Slévárenské slitiny vždy obsahují více křemíku, než je jeho maximální rozpustnost. Slévárenské slitiny tak vždy obsahují eutektikum $\alpha(\text{Al})\text{-Si}$. Eutektická koncentrace křemíku je 12,5 % Si a eutektická teplota je 577 °C. [3, 4]

Na základě rovnovážného diagramu Al-Si dělíme tyto slitiny na tři druhy:

- a) Podeutektické
- b) Eutektické
- c) Nadeutektické

Podeutektické slitiny mají mezi 5 – 11 % obsahu křemíku. Tyto slitiny mají dobré slévárenské vlastnosti. [3]

Eutektické slitiny se vyznačují obsahem křemíku blízko eutektickému bodu (12,5 %). Většinou mají eutektické slitiny mezi 11,5 – 13 % obsahu křemíku. Tyto slitiny se vyznačují nejlepšími slévárenskými vlastnostmi a vysokou pevností. [3]

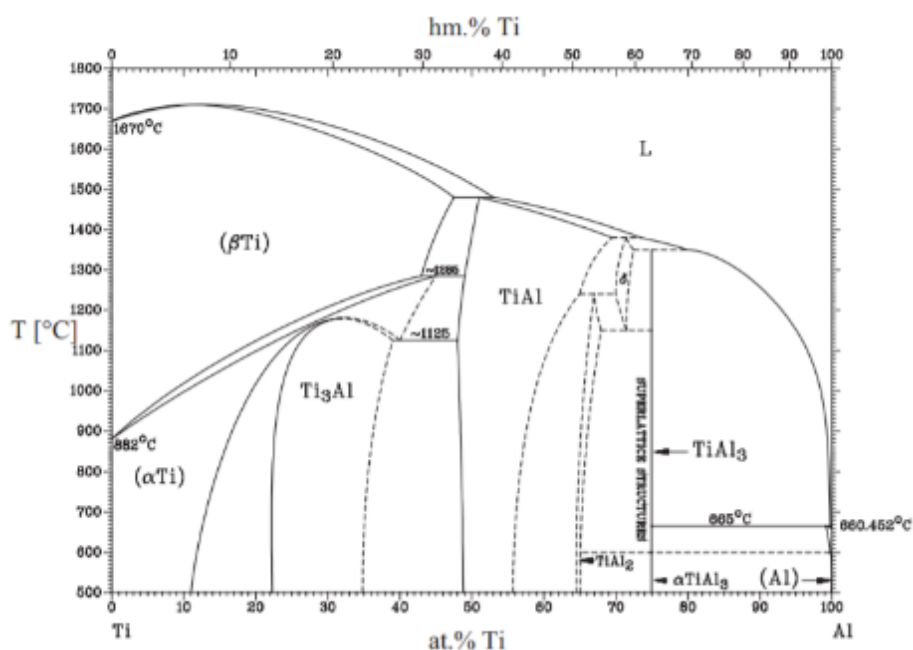
Nadeutektické slitiny Al-Si mají obsah křemíku vyšší než 12,5 %, většinou do 14 % Si, výjimečně se používají i slitiny s vyšším obsahem Si. Tyto slitiny mají nejvyšší tvrdost. [3]

2.1.2. Slitiny Al-Ti

Titan je běžnou příměsí v hliníku, jelikož TiO_2 je vždy přítomen v bauxitech. Titan se přidává obvykle k řadě průmyslových slitin hliníku z důvodu vysoce efektivní rafinace při lití. [1]

Rychlá solidifikace taveniny Al s Ti vede k tvorbě tuhých roztoků (Al) obsahujících až 0,2 % Ti, které slouží jako zárodky nukleace. Zájem o solidifikaci slitin Al – Ti je způsoben efektivním zjemňováním zrn vlivem Ti, což je také důvod, proč je titan používán u slitin hliníku jako očkovač.

Očkování samotným titanem je málo účinné. Zjemnění tuhého roztoku α titanem probíhá tak, že zbytky intermetalické fáze TiAl_3 , které nejsou úplně rozpuštěné po vnesení předslitiny typu AlTi do taveniny, působí jako krystalizační zárodky. V této souvislosti se projevuje výrazný vliv teploty očkování a doby výdrže na této teplotě. Čím vyšší teplota očkování a delší doba výdrže, tím více částic intermetalické fáze TiAl_3 se rozpustí a efekt očkování je nižší. Tento vliv teploty očkování a doby výdrže je méně výrazný tehdy, když je dostatečný obsah titanu v tavenině a může proběhnout peritektická reakce mezi Ti a Al , jejímž produktem je vyloučení fáze TiAl_3 v průběhu primární krystalizace. Tím dochází ke zvýšení počtu krystalizačních zárodků fáze TiAl_3 a zvýšení efektu očkování. Průběh této reakce však závisí na obsahu Ti v tavenině. Peritektická reakce mezi Ti a Al probíhá při teplotě 665°C a při koncentraci titanu 0.19 %. Zjemnění tuhého roztoku α samotným titanem se proto doporučuje jen tehdy, když obsah titanu v očkované slitině odpovídá maximálnímu množství, které připouští tolerance chemického složení pro danou slitinu. V tom případě je zaručený peritektický obsah Ti v tavenině. [1]

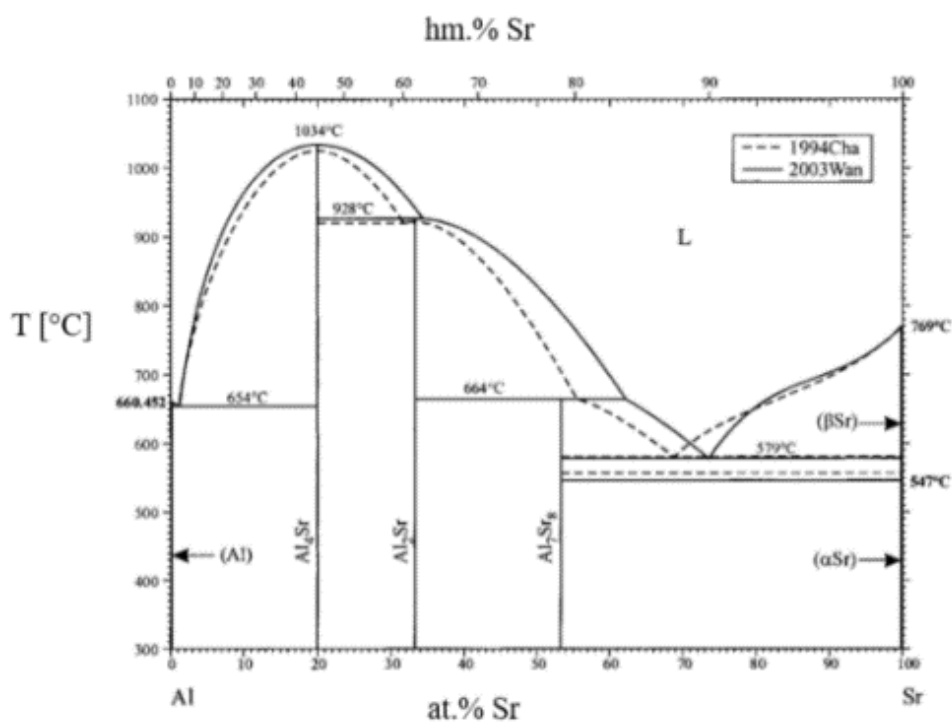


Obr. (2.1). 2 - fázový diagram systému hliník – titan [1]

Očkování titanem a borem ve vzájemné kombinaci se dosahují uspokojující výsledky zjemnění tuhého roztoku α . Tyto prvky v kombinaci mají slabší zjemňující účinek než samotný bor, ale vyšší zjemňující účinek než samotný titan. Zjemnění tuhého roztoku α titanem a borem v kombinaci se uskutečňuje účinkem fázi TiAl_3 a TiB_2 , které se vnášejí do taveniny předslitinami typu AlTiB . Nejčastěji se používají předslitiny, které mají obsah titanu 5 % a obsah boru 1 % (AlTi5B1). Tento poměr se v praxi ukázal jako nejvýhodnější, protože při dalším zvyšování tohoto poměru efektivita očkování klesá. [1]

2.1.3. Slitiny Al-Sr

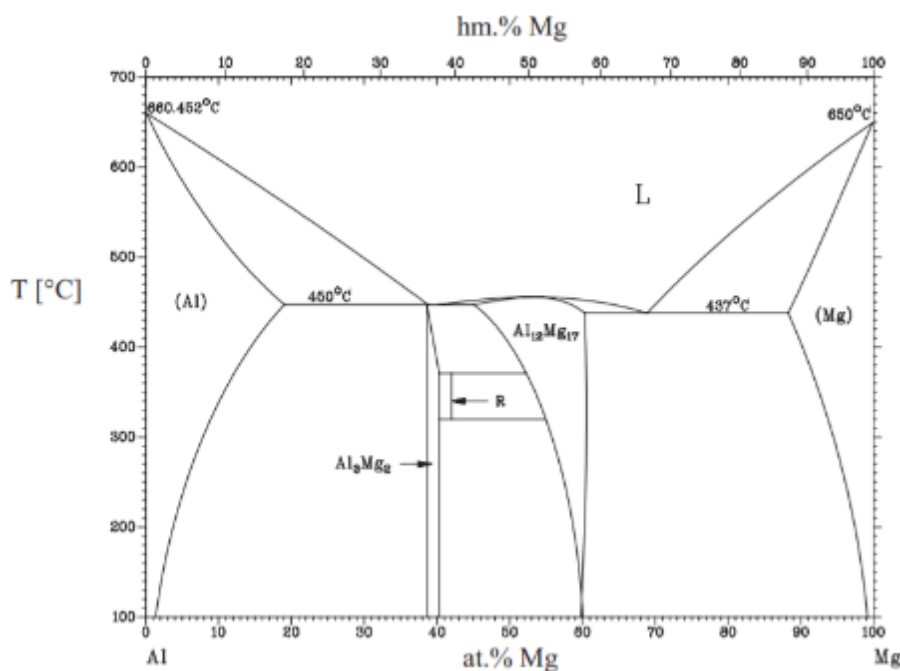
Stroncium je stále častěji používaným modifikátorem v podeutektických a eutektických siluminech. Jeho modifikační účinek je delší (1 až 2 hod.). Čas účinnosti stroncia je možné prodloužit až na 10 hodin přísadou 0.05 % až 0.2 % beryllia, které snižuje rychlost oxidace taveniny, a tím stabilizuje účinek stroncia. Výhodou stroncia, kromě delšího času účinnosti oproti sodíku, je i menší snížení teploty eutektické proměny. Stroncium se přidává ve formě předslitiny, např. AlSr10 . Předslitiny typu AlSr obsahují stroncium ve formě částic typu SrAl_4 . Množství předslitiny se musí přepočítat na optimální množství čistého stroncia, které dosahuje 0.03 % až 0.06 % a závisí na rychlosti ochlazování odlitku a na obsahu křemíku ve slitině. Při překročení optimálního množství vznikají křehké fáze typu $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{Sr}$ vyloučené v segregačních oblastech. [1]



Obr. (2.1). 3 - Fázový diagram systému Al – Sr [1]

2.1.4. Slitiny Al-Mg

Hořčík výrazně zlepšuje mechanické vlastnosti slitin hliníku. Pevnost s přísadou hořčíku postupně stoupá, tažnost zpočátku klesá a teprve od 3 % Mg se mírně zvyšuje. Obsah hořčíku ve slitinách pro tváření nebývá však vyšší než 7 %. Je to proto, že slitiny s vyšším obsahem Mg mají horší odolnost proti korozi a zejména horší tvárnost. Sklon ke korozi vyvolává sloučenina Al_3Mg_2 , která se vylučuje na hranicích zrn. Slitiny s hořčíkem zle značně zpevnit tvářením za studena při zachování vysoké korozní odolnosti i v mořské vodě a dobré svařitelnosti. [1]

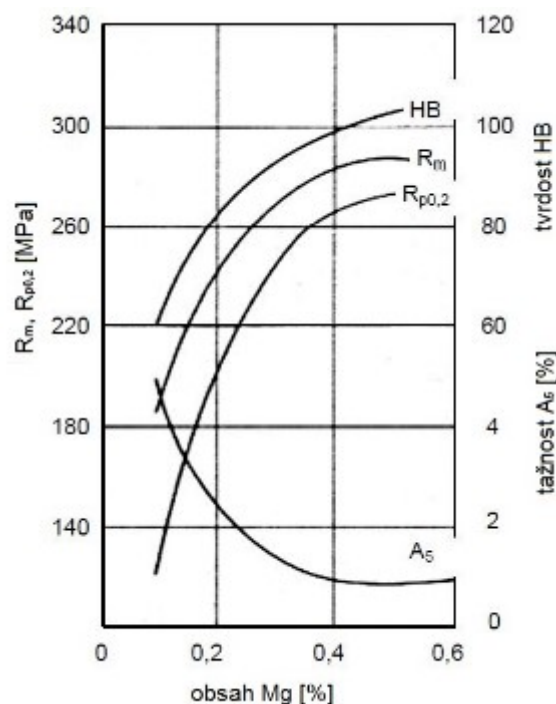


Obr. (2.1). 4 - Fázový diagram systému Al – Mg [1]

2.1.5. Slitiny Al-Si-Mg

Slitiny tohoto druhu jsou charakteristické obsahem hořčíku v rozmezí 0,25 – 0,70 %. Hořčík obsažený ve slitině umožňuje vytvrzování kovu za tepla, jelikož ve slitině vzniká intermetalická fáze Mg_2Si . V litém stavu jsou mechanické vlastnosti pouze průměrné, vysoké mechanické vlastnosti (R_m , $R_{p0,2}$, HB) se získávají následným vytvrzováním, během kterého však mírně klesá tažnost. Slitiny Al-Si-Mg jsou podeutektické a dělí se na dva typy podle obsahu křemíku: AlSi7Mg a AlSi10(9)Mg . [3]

Ze slitin AlSiMg se odlévají vysoce namáhané odlitky. Na obrázku 2.1.5 je zobrazena grafická závislost obsahu hořčíku na mechanických vlastnostech slitiny AlSi9Mg. Z grafu je patrné, že se vzrůstajícím obsahem hořčíku roste také mez pevnosti v tahu a mez kluzu. Zvyšuje se také tvrdost slitiny, naopak výrazně klesá tažnost. [3]



Obr. (2.1). 5 - Vliv obsahu hořčíku na mech. vlastnosti slitiny AlSi9Mg po vytvrzení [3]

2.1.5.1. Vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,3

Slitina AlSi7Mg0,3 je vysokopevnostní slitina s dobrou tažností a houževnatostí. Vyznačuje se výbornými slévárenskými vlastnostmi, dobrou odolností proti korozi, obrobitelností i svařitelností. Nejčastěji se odlévá gravitačně nebo technologií nízkotlakého lití, a to jak do pískových forem, tak do kovových. Tato slitina patří mezi vytvrditelné slitiny. Díky vytvrzování získá velmi dobré pevnostní vlastnosti, kterých by bez tepelného zpracování nebylo možné dosáhnout. [3]

Součásti odlévané z této slitiny se používají v leteckém či automobilovém průmyslu, jako součástky podvozků, litá kola a další díly, které vyžadují vysoké mechanické vlastnosti. [4]

Následující tabulky ukazují chemické složení a vybrané mechanické i technologické vlastnosti slitiny AlSi7Mg0,3 podle normy ČSN EN 1706:

Tab. (2.1). 2 - Chemické složení slitiny [5]

Chemické složení [%hm]							Obsah nečistot [%hm]
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Celkem
6,5-7,5	0,19	0,05	0,10	0,25-0,45	0,07	0,08-0,025	0,10

Tab. (2.1). 3 - Mechanické vlastnosti slitiny [5]

Stav slitiny	R _m [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A ₅₀ [%]	HBS
T6	290	210	4	90
T64	250	180	8	80

[R_m – mez pevnosti, R_{p0,2} – smluvní mez kluzu, A₅₀ – tažnost na 50 mm délky, HBS – tvrdost podle Brinella (EN 10003-1)]

Slitina AlSi7Mg0,3 je legována čtyřmi hlavními prvky: Si, Mg, Ti, Sr popsanými v kapitolách 2.1.1 – 2.1.4.

- Si je legován v podobě předslitiny AlSi20.
- Ti je legován v podobě předslitiny AlTi5B1.
- Sr je legováno v podobě předslitiny AlSr10.
- Mg je legován v čisté podobě - Mg99.

2.2. Mikrostrukturální vlastnosti slitin hliníku

Strukturu slitin určuje tvar rovnovážných diagramů hliníku s přísadovými prvky. Struktura slitin je ovlivněna tuhnutím slitiny. Tuhnutí začíná nukleací (vznik zárodků), přes růst krystalů až po plně ztuhlý kov. Potom následuje ochlazování.

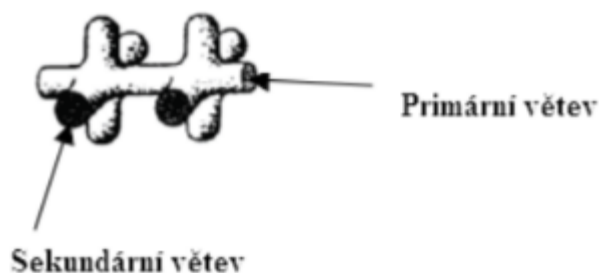
2.2.1. Tuhnutí primární fáze $\alpha(\text{Al})$

Nukleace primární fáze-obecně se nukleace krystalů dělí na homogenní a heterogenní. Homogenní nukleace probíhá u vysoce čistých kovů. U slitin hliníku probíhá heterogenní nukleace, při které vznikají v tavenině na mnoha místech stabilní zárodky krystalů. Zárodky krystalů vznikají na částicích, které jsou přítomné v tavenině. Jedná se o nečistoty, příměsi, částice uvolněné z vyzdívky pecí a tak dále. Ovlivňováním nukleace získáme různé velikosti i počet zrn, což má za následek ovlivnění mechanických vlastností slitin (slitiny s jemnozrnnou strukturou mají vyšší pevnost než slitiny s hrubozrnnou strukturou). Vznik zárodků umožňuje aktivační energie pro nukleaci zárodků. Nukleaci lze ovlivnit především rychlostí ochlazování taveniny a očkovaním [3].

Očkováním nebo rychlým ochlazením se zvyšuje počet krystalizačních zárodků. Při rychlém ochlazení slitiny dojde v tavenině k aktivaci zárodků, které jsou energeticky méně výhodné. U odlitků litých do kovových forem dochází k rychlému ochlazení. Díky tomuto rychlému ochlazení dochází k aktivaci většího počtu zárodků než u lití do pískových forem, kde je rychlost ochlazování menší. [3]

2.2.1.1. Vznik dendritické struktury

Po přidání přísadového prvku do taveniny nastane rozdíl mezi skutečnou teplotou a teplotou, která odpovídá místnímu chemickému složení. Tento rozdíl se nazývá koncentrační přechlazení. Koncentrační přechlazení má vliv na morfologii mezifázového rozhraní. Při zvětšování koncentračního přechlazení se tak mění mezifázové rozhraní z rovinného, přes buněčné na dendritické. Čím menší je teplotní gradient (to znamená čím je méně intenzivní ochlazení) v tavenině před procesem tuhnutí, tím tavenina inklinuje k dendritickému tuhnutí. Z toho plyne, že čím je větší koncentrační přechlazení, tím je větší tendence ke vzniku dendritické struktury [3].



Obr. (2.2). 1 - Dendrit [15]

Na krystalizačních zárodcích začnou vznikat útvary stromečkovitého rozvětveného typu. Tyto útvary se nazývají dendrity. Dendrity se skládají z primární větve a z ní vyrůstají sekundární větve. Dále mohou na sekundárních větvích vznikat dendritické větve vyšších řádů. Na začátku tuhnutí jsou mezery mezi sekundárními dendrity úzké. [16]

Při vzniku dendritické struktury rostou osy primárních dendritů ve směru teplotního gradientu. Rostou tedy proti směru odvodu tepla. Další růst větví dendritů je pravidelný. Chemické složení v daném místě slitiny a doba chladnutí ovlivňuje hustotu sekundárních a řádově vyšších větví. [3]

2.2.1.2. Hodnota SDAS

Vzdálenost sekundárních os dendritů, která se označuje jako SDAS (secondary dendrite arm spacing), je nejdůležitější pro popis dendritické struktury. Velikost dendritů není ovlivněna pouze na chemickém složení dané slitiny, ale také přenosem tepla v odlitku během tuhnutí. [3, 17]

Definice místní doby tuhnutí je čas, ve kterém klesne v daném místě teplota z teploty likvidu na teplotu solidu. Místní dobu tuhnutí můžeme získat pomocí křivek chladnutí z diagramu nebo pomocí simulačního programu, v němž provedeme simulaci tuhnutí. Na velikosti zrn ani na stavu krystalizačních zárodků nezávisí hodnota SDAS. Tato hodnota tedy nezávisí ani na vlivu očkování, ale ovlivňuje ji rychlost chladnutí v intervalu tuhnutí. Čím je tato doba kratší, tím menších hodnot DAS struktura dosahuje. [3, 18]

Závislost mezi dobou chladnutí a hodnotou SDAS je dána vztahem [3]:

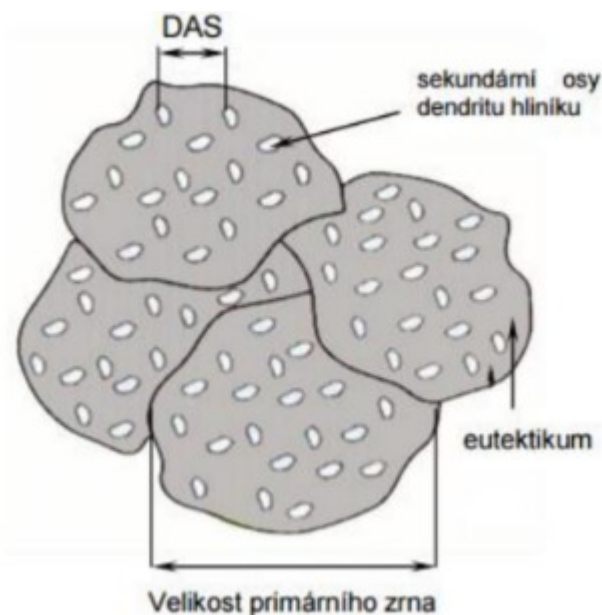
$$DAS = a \cdot t_f^n \text{ } [\mu\text{m}] \quad (1)$$

a – konstanta, která je závislá na slitině

n – konstanta, jejíž hodnota je v rozmezí 0,3; 0,5

f – místní doba tuhnutí [s]

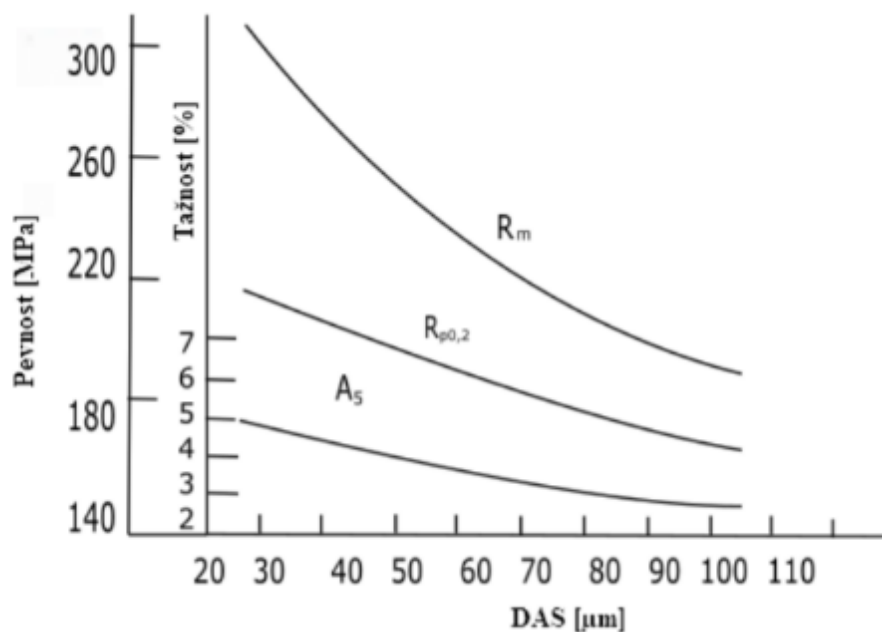
Tedy čím menší je velikost primárních zrn a hodnota SDAS, tím lepší je chemická a strukturní homogenita slitin a tím lze dosáhnout lepších vlastností. Zjemnění primární fáze při tuhnutí lze dosáhnout rychlým ochlazováním nebo očkováním. Strukturu rozlišujeme na silně dendritickou nebo slabě dendritickou. Silně dendritická struktura je ta struktura, u které jsou větve jasně zřetelné, lamely křemíku krystalizovaly v mezidendritických prostorech a tím tedy oddělily α -Al fáze. Slabě dendritickou strukturu tvoří polyedrická zrna, jehlice křemíku krystalizovaly v objemu, proto nejsou dendrity fáze α -Al dobře čitelné [3,19].



Obr. (2.2). 2 - Základní strukturní elementy v podeutektické slitině [3]

2.2.1.3. Vliv SDAS na mechanické vlastnosti

Na velikosti hodnoty SDAS je závislá celá řada strukturních jevů. Čím je struktura jemnější, tím pádem je menší hodnota SDAS. Při menší hodnotě SDAS vznikají menší segregační závislosti a tím vznikají menší částice intermetalických vměstků. Nečistoty obsažené v tavenině se vylučují odděleně v mezidendritických prostorech. Z tohoto důvodu vzniká z hlediska chemického složení více homogenní slitina. Při snížení hodnoty SDAS má výsledná slitina lepší mechanické vlastnosti. [3,20]



Obr. (2.2). 3 - Závislost mechanických vlastností slitin na DAS [3]

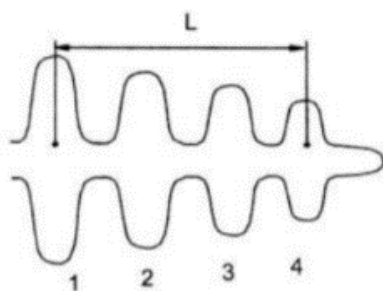
2.2.1.4. Měření SDAS

Měření probíhá na metalografickém výbrusu, kde se na dendritu změří vzdálenost přes několik sekundárních os dendritu. Tato naměřená vzdálenost se vydělí počtem mezer mezi měřenými osami (viz. obr. 2.2.3). [3]

$$DAS = \frac{L}{n-1} \quad [\mu m] \quad (2)$$

n - počet sekundárních os [-]

L - naměřená vzdálenost přes sekundární osy [μm]



Obr. (2.2). 4 - Měření DAS [3]

U silně dendritické struktury není problém najít vhodný dendrit pro měření hodnoty DAS. Naopak na některých výbrusech je problém najít dendrit, který je dobře čitelný. Proto na nečitelných výbrusech se pro určení hodnoty DAS používá vztah [19]:

$$DAS = \frac{L}{n-1} \cdot \frac{1}{V} \quad [\mu\text{m}] \quad (3)$$

n - počet sekundárních os [-]

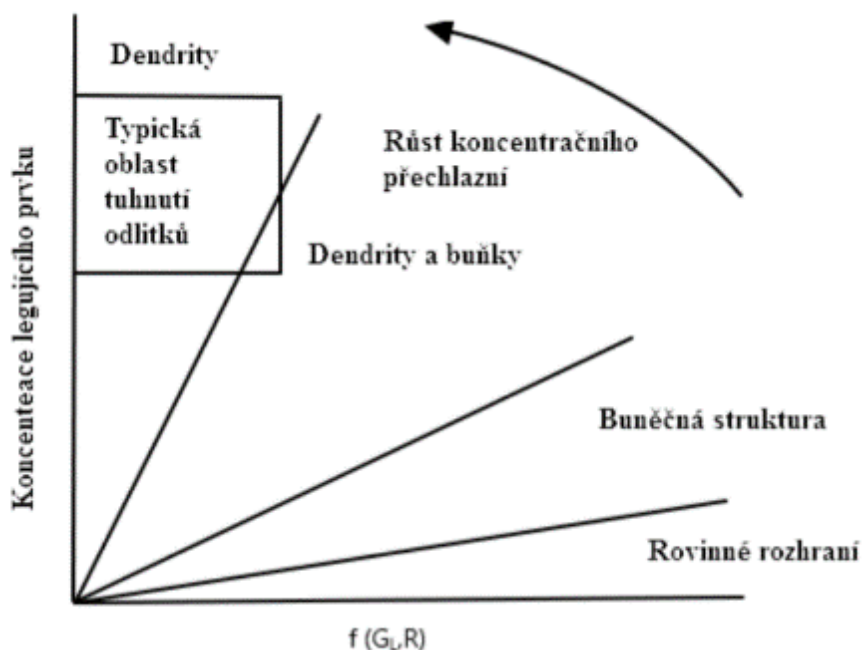
L - naměřená vzdálenost přes sekundární osy [μm]

V – hodnota zvětšení snímku [-]

2.2.1.5. Růst primární fáze

Růst krystalizačních zárodků začíná po jejich nukleaci, a to až do té doby, než je omezen sousedními krystaly. Hrubozrnnou a jemnozrnnou strukturu nám určuje počet aktivních krystalizačních zárodků. Pokud je v tavenině málo krystalizačních zárodků, výsledkem bude hrubozrnná struktura. Růst krystalů závisí na obsahu přísadového prvku, na jejich vzniku a na koncentračním přechlazení. Velikost koncentračního přechlazení vychází z koncentračního gradientu přísadového prvku na mezifázovém rozhraní, z teplotního spádu v tekuté fázi na krystalizační frontě – G_L a z rychlosti růstu primární fáze – R . [3]

Popis tvaru strukturních složek vyjadřuje pojem morfologie struktury. V případě malého koncentračního přechlazení dosahuje jen několik kelvinů. Intenzita chlazení je také malá, a proto nastává buněčné tuhnutí. Tuhnutí odlitků probíhá obvykle, když koncentrační přechlazení je velké a chemicky nehomogenní. Díky tomuto dochází k tuhnutí odlitků, kdy nastává růst dendritů. Příkladový prvek se vylučuje do taveniny i do mezidendritických prostor. Rychlost ochlazování odlitků je velmi významná pro tvorbu struktury odlitků. Díky tomuto se liší struktura odlitků litých do pískových a kovových forem. [3]



Obr. (2.2). 5 - Souvislost morfologie tuhé fáze s velikostí koncentračního přechlazení [3]

Tuhnutí se dělí podle toho, jak narůstá tuhá vrstva na:

- Exogenní tuhnutí – roste více celistvá vrstva. Tato vrstva roste směrem od povrchu odlitku do tepelné osy.
- Endogenní tuhnutí – tuhnoucí krystaly rostou i v objemu kovu před krystalizační frontou.

Blíže k povrchu je tendence k exogennímu tuhnutí s hladkým rozhraním, dále od povrchu dochází spíše k tuhnutí objemovému. Vliv na to, jestli slitina bude tuhnout exogenně nebo endogenně, má i interval tuhnutí. Když je interval tuhnutí úzký, bude probíhat krystalizace spíše exogenně. U širokého intervalu tuhnutí bude krystalizace probíhat buněčným způsobem nebo endogenně. Očkování i modifikace má také vliv na průběh tuhnutí. Při očkování bude probíhat spíše endogenní objemové tuhnutí, u modifikace endogenní vrstvené nebo exogenní s rovinným rozhraním [3].

2.2.2. Modifikace a očkování

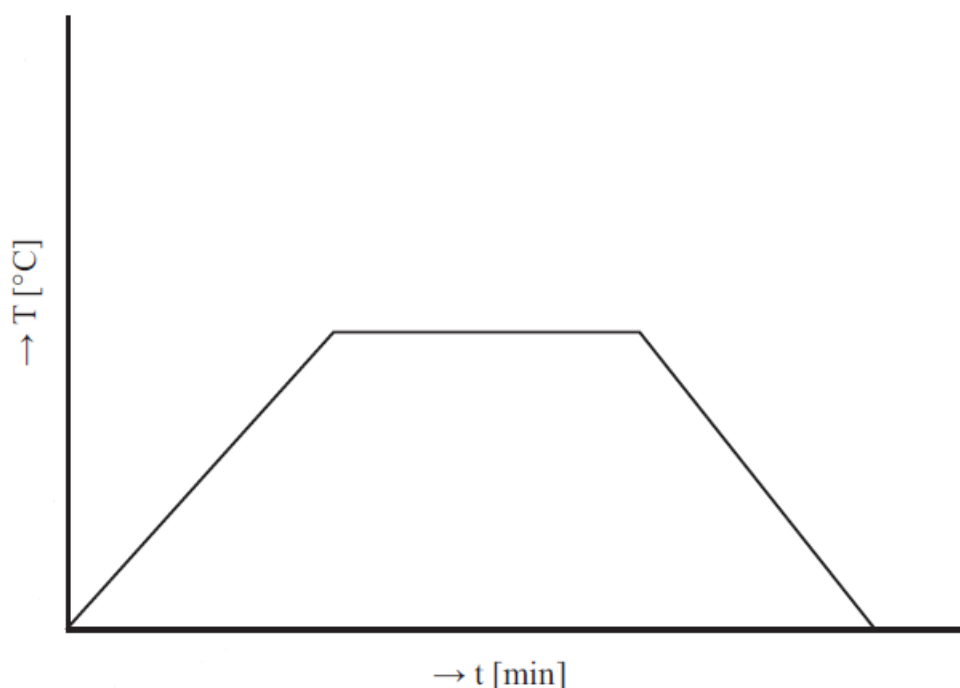
Modifikace slitin je metalurgická operace, při které dochází ke změně tvaru a rychlosti růstu krystalů eutektického křemíku po přidavku některých prvků. Modifikačními činidly jsou povrchově aktivní látky (soli: NaCl; KCl; NaF, stroncium, antimon), které se před odléváním přidávají do taveniny. Prvky přednostně adsorbují na krystalografických plochách Si, které jsou pro růst krystalů výhodnější. Modifikací se dosahuje zjemnění eutektického křemíku. Dochází k převedení zrnité eutektické struktury na strukturu lamelární nebo na jemně vláknitou. Modifikovaný eutektický křemík netvoří ostré hrubozrnné útvary, ale jemnou síť trubiček až vláken. Zlepšují se tím mechanické vlastnosti slitin, zvyšuje se houževnatost, pevnost v tahu a tažnost slitiny [1, 21].

Očkování je dalším typem metalurgické úpravy tekutého kovu. Očkováním se zvyšuje počet různorodých krystalizačních zárodků v tavenině. Účelem procesu je vnést do taveniny nukleační zárodky, které zjemní krystaly primární fáze. Do taveniny se přidává malé množství vhodně zvolené látky, která ovlivňuje proces krystalizace. Očkováním se zjemňuje struktura slitiny z hrubě zrnité na jemně zrnitou. Po přidání očkovačů do taveniny je nutná určitá doba, než se získá nejjemnější zrno. Tato doba se nazývá dobou kontaktu. Touto metodou se zvláště ošetřují podeutektické a nadeutektické siluminy. V závislosti na chemickém složení siluminů může být očkovačem např. titan, kombinace titanu a boru nebo fosfor. Očkováním se zvýší pevnost a tažnost taveniny, sníží se sklon slitiny ke vzniku trhlin. Odlitky mají menší pórovitost, větší těsnost a jsou lépe obrobitelné [1, 21].

2.3. Tepelné zpracování hliníku a jeho slitin

Ve smyslu ČSN 42 0056 lze tepelné zpracování hliníku a jeho slitin definovat jako pochod, při kterém jsou výrobek nebo jeho část v tuhém stavu podrobeny jednomu nebo více žíhacím cyklům za účelem dosažení požadované struktury / substruktury a vlastností. [1]

Žíhací cyklus je definován jako změna teploty výrobku v určitém rozmezí v závislosti na čase.



Obr. (2.3). 1 - Schéma žíhacího cyklu [1]

Tepelné zpracování Al a jeho slitin můžeme rozdělit do dvou základních skupin: [1]

- Žíhání
- Vytvrzování

2.3.1. Precipitační zpevnění – vytvrzování

Vytvrzováním se dají ve značném rozsahu měnit mechanické, fyzikální i technologické vlastnosti slitin. Podmínkou je, že tyto slitiny mají z hlediska příslušného rovnovážného diagramu výraznou změnu rozpustnosti legujícího prvku / prvků na teplotě. Změna rozpustnosti v tuhém roztoku α je tedy základním předpokladem pro vznik přesyceného tuhého roztoku α . [1]

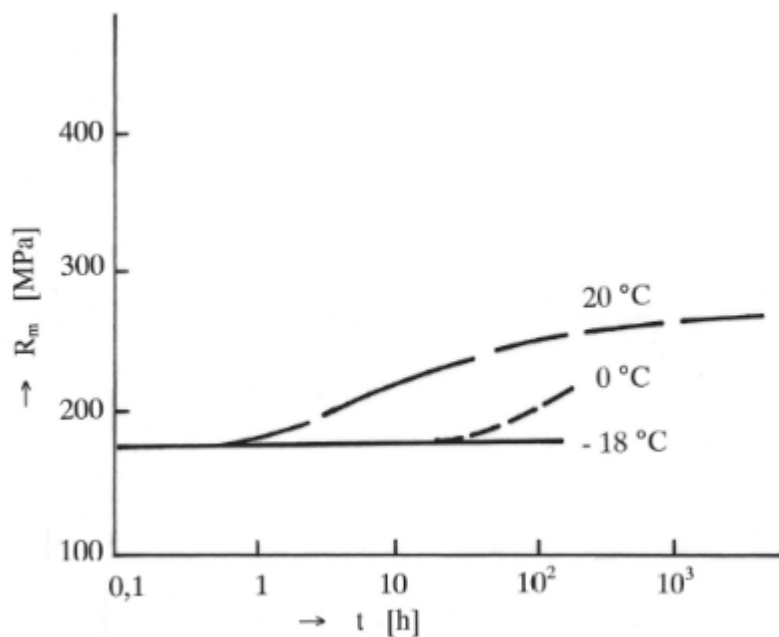
Vytvrzování se skládá ze dvou technologických úkonů, které na sebe navazují a vzájemně souvisí do té míry, že každé dílčí provedení ovlivňuje konečný výsledek. Jedná se o: [1]

- Rozpouštěcí žíhání – je ohřev na vhodnou rozpouštěcí teplotu, výdrž na této teplotě po dobu nutnou k převedení jedné nebo více intermetalických fází do tuhého roztoku a následující rychlé ochlazení kritickou nebo nadkritickou rychlostí k získání prosyceného tuhého roztoku α . Kritická rychlost ochlazování je nejmenší rychlost ochlazování z rozpouštěcí teploty, při které nenastává rozpad přesyceného tuhého roztoku
- Stárnutí – je proces, při kterém dochází ke změně substrukтуры a v důsledku toho i ke změně mechanických, fyzikálních i technologických vlastností. Může se realizovat buď za pokojové teploty (přirozené stárnutí), nebo za zvýšených teplot (umělé stárnutí). Někdy se z technologických důvodů realizuje stupňovité stárnutí, což je proces tepelného zpracování po rozpouštěcím žíhání uskutečnění při dvou nebo více teplotách, které se zvyšují během tohoto žíhacího cyklu.

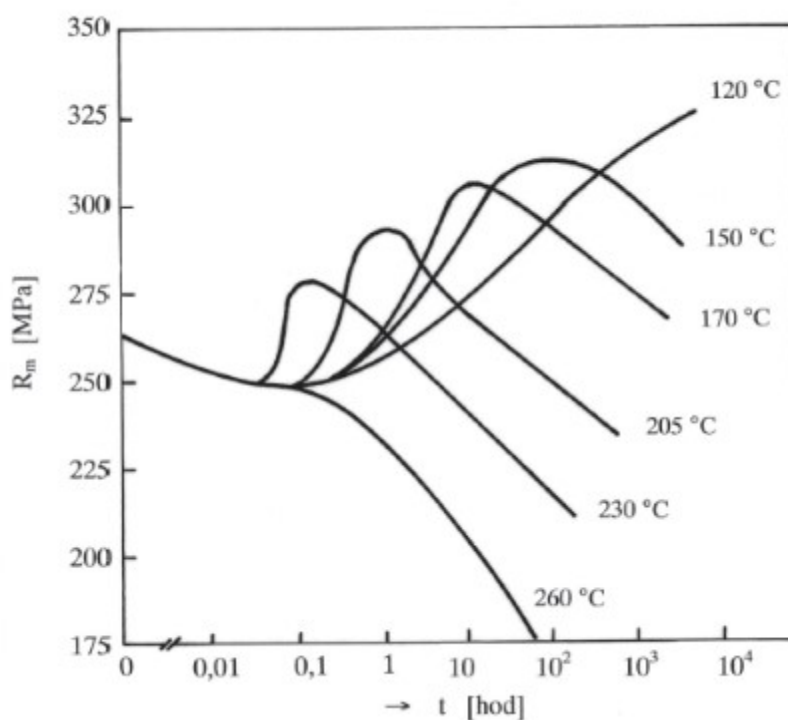
Vzhledem k tomu, že se při kalení např. do vody, při ponoření materiálu, který má daleko vyšší teplotu, než je teplota bodu varu vody, vytváří na povrchu pára, kterou je nutno průběžně odstraňovat, je nutná cirkulace vod, resp. kalícího média na bázi vody. [1]

Stárnutím lze získat maximálně možné vysoké pevnostní vlastnosti, specifické pro každou slitinu. Čas, za který se rozpad přesyceného tuhého roztoku uskuteční, závisí především na chemickém složení slitiny. Lze říci, že od doby, kdy byl získán přesycený tuhý roztok, až po dobu, kdy jsou získány požadované vlastnosti, dochází nepřetržitě k vnitřním změnám a v důsledku toho ke změnám mechanických, fyzikálních, korozních i technologických vlastností. Tyto permanentní změny jsou nazývány kinetikou rozpadu. [1]

U slitin typu Al-Si-Mg nelze dosáhnout vysokých pevnostních vlastností přirozeným stárnutím – vždy se aplikuje umělé stárnutí.



Obr. (2.3). 2 - křivka kinetiky rozpadu slitin Al-Mg-Si pro přirozené stárnutí [1]



Obr. (2.3). 3 - křivka kinetiky rozpadu slitin Al-Mg-Si pro umělé stárnutí [1]

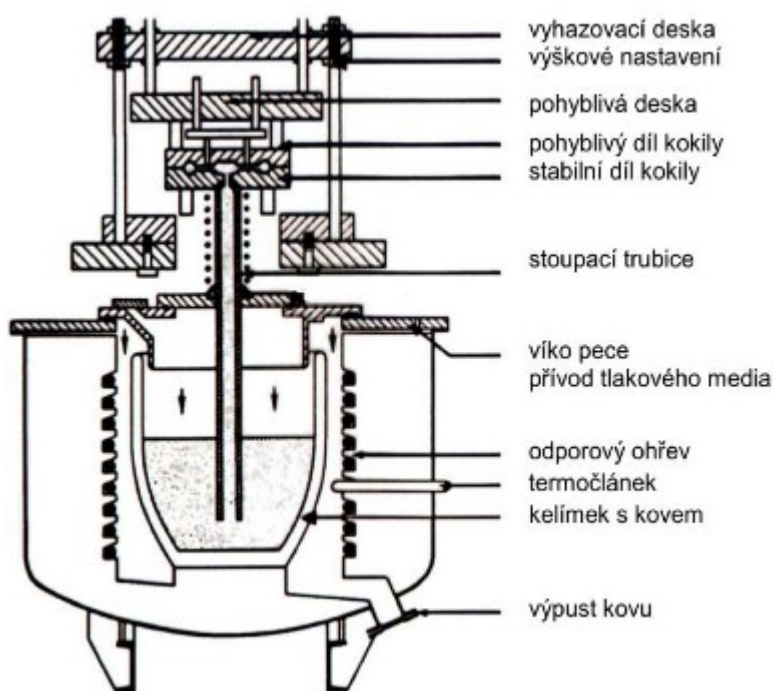
Z obrázků výše je patrné, že při přirozeném stárnutí při 20 °C nelze dosáhnout R_m nad 300 MPa ani po dlouhé době převyšující 2 měsíce. Umělým stárnutím, např. při 170 °C lze hodnotu R_m vyšší než 300 MPa získat již po 10 hodinách. [1]

2.4. Charakteristika technologie nízkotlakého lití (LPDC)

Rostoucí počet aplikací této technologie a produktů pomocí jí vyrobených je jasným důkazem úspěchu a stálého rozvoje slévárenských slitin hliníku. Známé výhody spojené s používáním slitin hliníku (nízká hmotnost, dobré mechanické vlastnosti, dobrá odolnost proti korozi atd.) představují hybnou sílu pro zavedení nových aplikací a designu na jedné straně a na druhé straně prostor pro vývoj nových procesních řešení.

Nízkotlaké lití je jedna z nejlukrativnějších technologií vhodných pro zpracování slitin hliníku, a to díky svým charakteristikám, které v několika případech umožňují vynikající kompromis mezi kvalitou, náklady, produktivitou a geometrickou přesností. I když je takový proces lití poměrně starý (první patent na odlévání slitin olova byl uložen v Anglii v roce 1910), jeho významná průmyslová aplikace začala teprve před třiceti lety [5].

V současné době se používá pro odlévání slitin na bázi hliníku a hořčíku. Princip tohoto procesu je poměrně jednoduchý: trvalá forma a vtoková soustava jsou umístěny nad pec obsahující roztavenou slitinu (obr. 2.4.1) Plnění dutiny se dosáhne vynucením (pomocí stlačeného plynu, obvykle v rozmezí od 0,3 do 1,5 baru) roztaveného kovu, aby stoupal keramickou trubicí, která propojuje formu s pecí. Obecně lze říci, že tlak v takovéto soustavě odpovídá zhruba metalostatickému tlaku 2 metrů hliníkové masy [6].



Obr. (2.4). 1 - obecné schéma lícího stroje nízkotlakého lití [10]

Jakmile je dutina formy vyplněna, přetlak v peci je odstraněn a zbytkový roztavený kov v trubce teče opět k peci. Jednotlivé části formy se poté oddělí a odlitek se nakonec extrahuje. Zvláštní pozornost je třeba věnovat konstrukci takovéto formy, která nám umožní správné řízení tuhnutí slitiny pomocí chladicích okruhů, ať už vzduchových, či vodních. Oblast odlitku s nejvyšším modulem by měla být poslední, která tuhne a umístěna v blízkosti právě vtoku plnicí trubice, který funguje jako „virtuální“ náletek a umožňuje vyhnout se použití konvenčních náleků, čímž výrazně zvyšuje využití tekutého kovu. Nízká rychlost plnění a relativně vysoká doba cyklu vedou k dobré kontrole dynamiky tekutin tohoto procesu, čímž se dá zabránit, či omezit vady způsobené turbulentního plnění. Lze vyrábět odlitky do hmotnosti 70 kg s tolerancemi 0,3 - 0,6 % [7, 8].

Forma může být navržena jak pro kusovou výrobu, tak pro sériovou v závislosti na požadované velikosti odlitků a vlastnostech lícího stroje.

Výhod nízkotlakého lití je několik: [9]

- vysoké využití tekutého kovu (obvykle přes 90 %)
- snížení nákladů na obrábění díky absenci náleků
- vynikající kontrola procesních parametrů, která se zlepšuje s narůstajícím stupněm automatizace
- dobrá metalurgická kvalita díky homogennímu složení a kontrolované dynamice tuhnutí, což vede k dobrým mechanickým a technologickým vlastnostem odlitků

2.5. Charakteristika technologie nízkotlakého lití s protitlakem (CPDC)

Použití hliníkového odlitku pro výrobu automobilových součástí sahá až do rané historie automobilového průmyslu. Zatímco hliníkové odlitky se široce používají v aplikacích hnacích ústrojí a převodovek, jejich použití v náročnějších konstrukčních výrobcích pro podvozky, těhlice a části systému řízení se rozrostlo až v posledním desetiletí. Požadavky na servis, provozní zatížení a bezpečnostní požadavky na tyto výrobky vyžadují materiály a výrobní procesy schopné vyrábět součásti s vysokou pevností a tažností.

Tento růst byl výsledkem pokroku v technologiích odlévání používaných pro slitiny hliníku. To zahrnuje lepší kontrolu prostřednictvím modelovacích procesů a komplexnější pochopení faktorů, které přispívají k získání maximální pevnosti, tažnosti a cyklických mechanických vlastností. Většina těchto nedávno získaných znalostí je výsledkem společné průmyslové účasti na projektu "Design a optimalizace výrobků pro odlitky ze slitin lehkých kovů" sponzorovaného programem USA Automotive Materials Partnership – Automotive Materials Division (USAMPAMD). Mezi klíčové funkce, které byly definovány, patří: [10]

- Řízené tavení a tuhnutí kovu
- Plynulý pohyb taveniny a plnění formy
- Predikce procesu pomocí modelovacích softwarů
- Dobrá mikrostruktura dosažená prostřednictvím rychlého ochlazení
- Řízené směrové tuhnutí
- Eliminace tvorby oxidů a pórů
- Reprodukovatelné, opakovatelné a sledovatelné procesy

To vedlo k rozsáhlému použití licích procesů, které využívají kovové formy. Klidné, plynulé plnění bylo zajištěno plněním tekutého kovu od spodu (jako například u nízkotlakého lití kol), nebo pomocí procesů, které simulují tento postup (odlévání nakloněním do trvalé formy). Snížení porozity může být dosaženo použitím tlaku vyšším, než je atmosférický, což pomáhá zhutňovat tuhnoucí kov. [10]

V následujících částech bude popsáno využití procesu lití CPDC, který řeší nedostatky pozorované u podobných technologií lití, jako jsou nízkotlaké lití, lití ve vakuu, kombinace nízkotlakého lití a lití ve vakuu, vytlačovací lití (squeeze casting). Vývoj procesu nízkotlakého lití s protitlakem eliminuje tyto nedostatky regulováním plnění formy, aby se zajistila skutečná rovnoměrnost toku kovu, zabraňovalo vnikání plynů během plnění a bylo zajištěno jak usměrněné, tak rovnoměrné tuhnutí a tím pádem i vynikající pevnost a tažnost součástí, jako jsou těhlice, které jsou vyráběny procesem CPDC. [10]

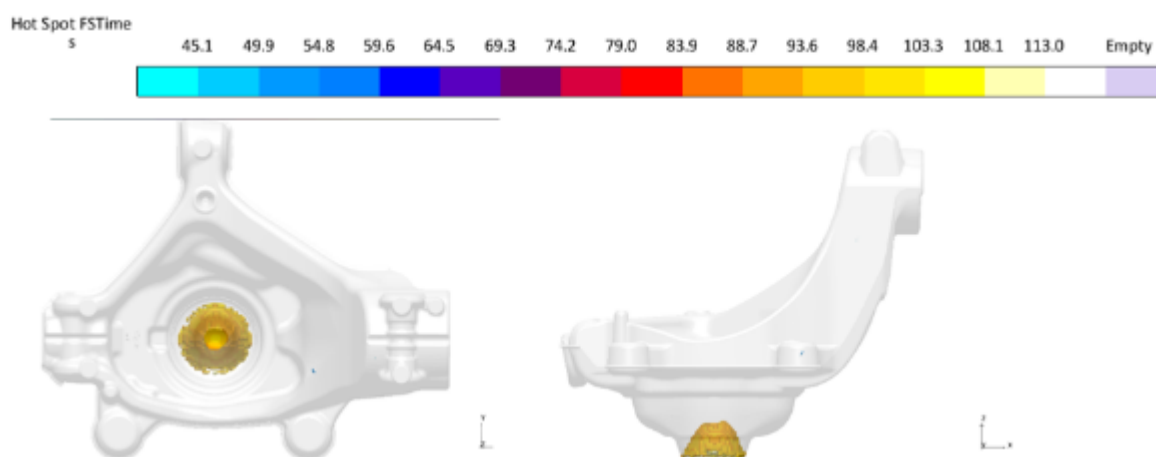
2.5.1. Procesní modelování

Zásadní vlastností pro správnou implementaci a použití CPDC je aplikace počítačové simulace a modelování procesů. To zahrnuje nejprve modelování sekvence plnění, zahrnující použití protitlaku směřujícímu proti proudu kovu. Tyto informace a výsledná distribuce teploty se využívají k modelaci tuhnutí kovu v dutině formy. [10]

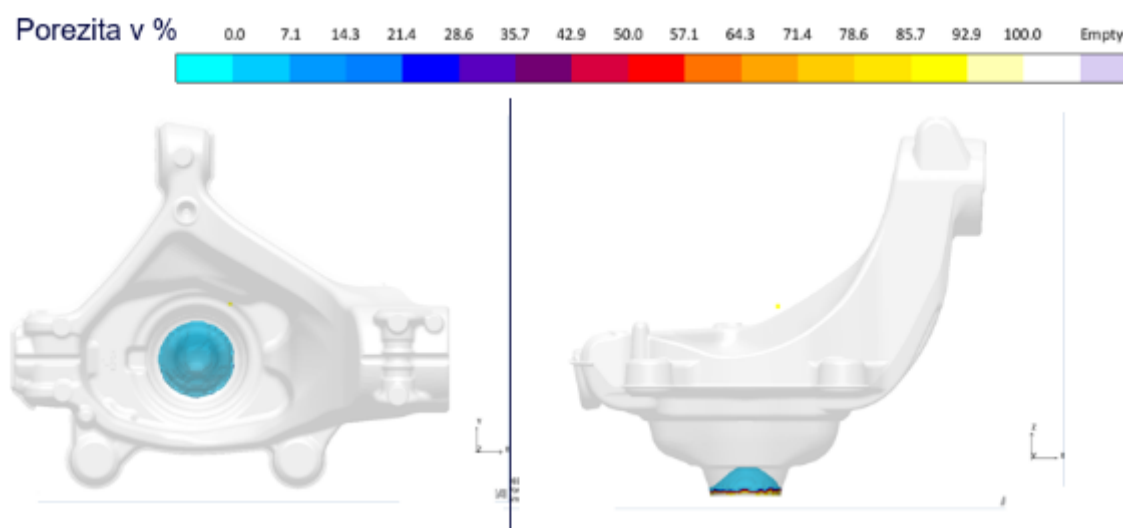
Prvním krokem v tomto procesu je často provedení „přirozeného“ ztuhnutí, tj. postupné tuhnutí kovu v průběhu času bez vnějšího chlazení mimo přirozený odvod tepla materiálem základní kovové hmoty. To bude určující pro zjištění umístění tepelného uzlu (tzv. hot spot) a míst, kde je třeba použít chladicí potrubí (voda a / nebo vzduch). Během tohoto analytického procesu se provádí několik iterací, aby se vstup pro distribuci teploty materiálu kovu uvedl do ustáleného stavu. Toto tvrzení se při správném nastavení vstupních parametrů ve velké míře shoduje s tím, co se vyskytuje ve skutečné výrobě odlitků. [10]

Nakonec jsou zkoumány různé konfigurace chladicích trubic, rychlost chlazení a parametry plnění formy, dokud není dosaženo požadované úrovně kvality dílů, konstrukce nástrojů a doby výrobního cyklu. Tato informace je poté začleněna do CAD modelů pro konstrukci formy a nastavení parametrů pro první vzorkování formy. [10]

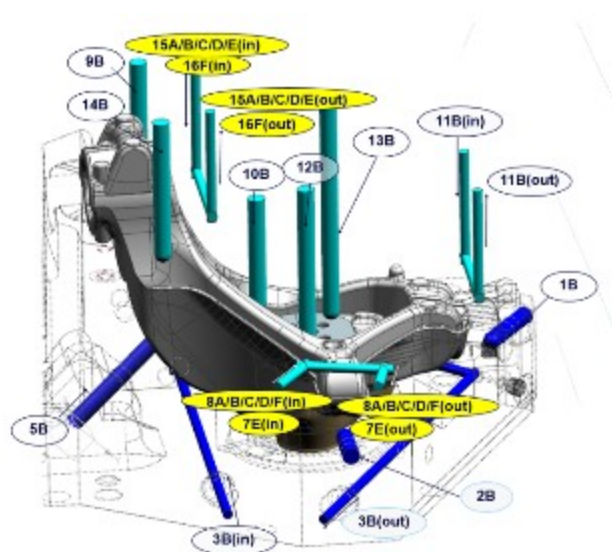
Příklady této analýzy jsou uvedeny na obrázcích 2.5.1 – 2.5.3. Na těch je znázorněno, jak jsou modelovány predikce tepelných uzlů, staženin a konfigurace chladicích obvodů, které se používají jako počáteční vstupy pro fázi vzorkování.



Obr. (2.5). 1 - Softwarová predikce výskytu hot spotů



Obr. (2.5). 2 - Softwarová predikce výskytu staženin



Obr. (2.5). 3 - Softwarová modelace chladičského systému

2.5.2. Popis procesu CPDC

2.5.2.1. Tavba

Pro tavbu se používá standardně poměr vstupního materiálu: 50% primár / 50% sekundár. Primární materiál je materiál nakoupený u externího dodavatele v podobě housek ze slitiny AlSi7Mg0,3 s přesným chemickým složením. Sekundární materiál je také ze slitiny AlSi7Mg, nemá ale 100% zaručené přesné chemické složení a může být pořízen různými způsoby a do tavby je přidávám v různém poměru: vratný materiál nakoupený od externího dodavatele, nebo vlastní vratný materiál (zmetky, odřezané nálitky, housky vytavené z kovu v havarijních pánvích).



Obr. (2.5). 4 - Tavící pec StrikoWestofen GmbH MH II(RD)-N 6000/400 G-eg

Tab. (2.5). 1 - Parametry tavící pece

Kapacita tavící pece (max.)	6000 kg
Teplota spalin (max.)	250 °C
Teplota tavícího prostoru (max.)	950 °C
Teplota stropu (max.)	900 °C
Teplota lázně (max.)	740 +/- 15°C

2.5.2.2. Odplynění

Odplyňování je metalurgická operace, jejímž úkolem je snížit obsah vodíku na takovou úroveň, při které nedojde k vyloučení bublin. Vodík je hlavní příčinou naplynění roztavené slitiny. Pro zamezení vzniku bublin je třeba obsah vodíku v tavenině snížit pod kritickou hodnotu 0,2 až 0,1 cm³ /100 g Al. Jejich vznik je ovlivněn rychlostí tuhnutí slitiny, čím pomalejší je tuhnutí, tím dokonalejší musí být odplynění. [3]

K odplyňování dochází ještě před odléváním: vakuováním taveniny, probubláváním taveniny inertními plyny (N₂, Ar), nebo probubláváním taveniny reaktivními plyny na bázi chloru (N₂ + Cl₂, ponořováním tablet C₂Cl₆ a další). [3]

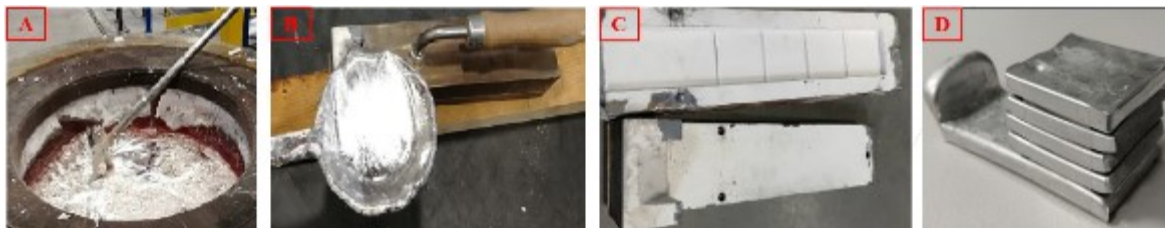
Účinek odplyňování se prověřuje laboratorními či provozními metodami. Nejrychlejší orientační provozní metody jsou optické – např. K-MOLD. Měření pomocí přístrojů patří k přesnějším metodám – např. metoda dvojího vážení (RTP).



Obr. (2.5). 5 - Odplyňovací zařízení

K-MOLD metoda

K-MOLD metoda slouží k vyhodnocení přítomnosti vměstků v tavenině.



Obr. (2.5). 6 - Průběh K-MOLD zkoušky

Po ukončení procesu odplynění je odstraněna struska (obr. 2.5.6-A) a odebrán vzorek taveniny pomocí naběračky (obr. 2.5.6-B) do formy (obr. 2.5.6-C). Vzorek je po vychladnutí upnutý do svěraku a nalámán na menší kousky (obr. 2.5.6-D).

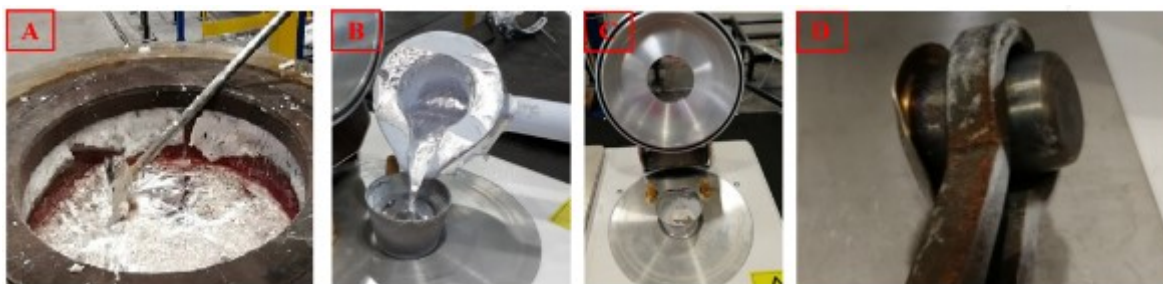
Vyhodnocení této zkoušky probíhá vizuálně na základě etalonu vzorků (obrázek 2.5.7).



Obr. (2.5). 7 - Etalon vzorků K-MOLD

RTP metoda

RPT metoda slouží k vyhodnocení míry naplynění taveniny, která ztuhne při atmosférickém tlaku nebo podtlaku. Vodík se při tuhnutí vylučuje z kovu ve formě bublin, které v něm expandují a zůstávají v něm uzavřeny pod tuhnoucí kůrou. Objem bublin kompenzuje objemový úbytek kovu v důsledku stahování při tuhnutí a vznik bublin se tak projeví "růstem" vzorku. Hladina vzorku s nízkým obsahem vodíku proto má propadlý tvar, zatímco hladina naplyněného vzorku má tvar vypouklý.



Obr. (2.5). 8 - Průběh RTP zkoušky

Po ukončení procesu odplynění je odstraněna struska (obr. 2.5.8-A) a odebrán vzorek taveniny pomocí přehřáté naběračky (obr. 2.5.8-B) do formy, která už je umístěná ve vakuovacím přístroji (obr. 2.5.8-C). Po ukončení cyklu vakuování je vzorek vytažen pomocí kleští (obr. 2.5.8-D).

Vyhodnocení této zkoušky probíhá na základě hustoty tohoto vzorku, která je zjištěna zvážáním vzorku nejdříve na vzduchu a poté zvážáním po ponoření do kádinky s vodou – metoda dvojího vážení.



Obr. (2.5). 9 - Vzorek pro vyhodnocení RTP testu

Principem metody dvojího vážení je porovnání hustoty vzorku slitiny, který ztuhl za podtlaku. Za podtlaku je v kovu nižší rozpustnost vodíku a proto se vyloučí více vodíkových bublin než při atmosférickém tlaku. Bubliny zůstávají v kovu uzavřeny a tím snižují jeho hustotu. Pokud má vzorek po odplynění hustotu $2,57 \text{ g/cm}^3$ a výše, znamená to, že vzorek nemá žádné vnitřní bubliny nebo minimální.



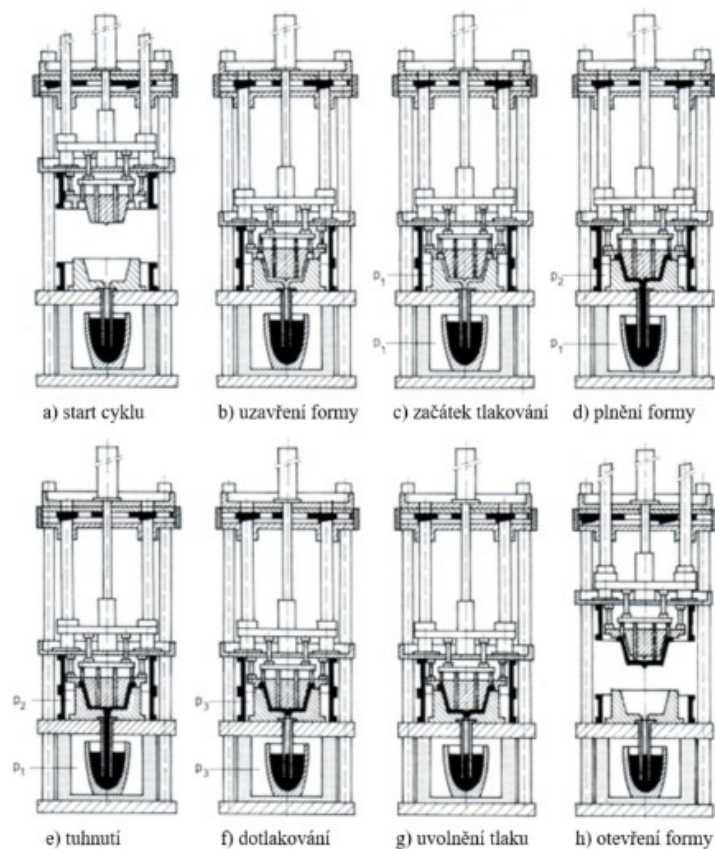
Obr. (2.5). 10 - Etalon vzorků RTP

2.5.2.3. Lití

Proces CPDC – technologie lití s protitlakem (Counter Pressure Die Casting) využívá forem s horizontální dělicí rovinou umístěných nad pecní komorou (viz. obrázek 2.5.11). Forma a komora pece jsou spojeny keramickou plnicí trubicou. Forma je navíc uzavřena tlakovým víkem. Na začátku liciho cyklu jsou obě oblasti – jak forma, tak pec - naplněny tlakem na systémem nastavenou hodnotu tlaku, obvykle mezi 0 a 6 bar. Plnění formy nastává v důsledku rozdílu tlaků mezi komorou pece a komorou formy nastavenou o cca 300 - 1 000 mbar, což zapříčiní stoupání roztaveného kovu do formy a vyplňuje dutinu. Tlak je udržován nad kovovou lázní během celého procesu lití, dokud tuhnutí není zcela dokončeno. Po dokončení procesu plnění je dutina formy odvzdušněna, čímž se uvolní tlak z komory pece. Po ochlazení se forma otevře, odlitek je vyražen a začne další odlévací cyklus. V závislosti na geometrii odlévání jsou dosaženy doby sériového výrobního cyklu mezi 140 a 210s. Ke zkrácení dob cyklu přispívá také intenzivní systém chlazení formy. Uspořádání a řídicí systém chladicích smyček umožňují řízené tuhnutí ve směru přívodní trubky. Využití tekutého kovu je extrémně vysoké, často přesahuje i hodnotu 95%. [10]



Obr. (2.5). 11 - Schéma liciho CPC stroje [11]



Obr. (2.5). 12 - schéma procesu CPDC [10]

V zásadě může jakákoliv vada vzniklá při litím tímto způsobem vést k předčasnému selhání odlitku při mechanickém namáhání. Mechanické vlastnosti odlitku jsou převážně ovlivněny obsahem plynů, pórovitostí mikrostruktury při tuhnutí a nekovovými vměstkami. Předpokladem pro zlepšení mechanických vlastností odlitků je současně snížení strukturálních vad a tvorba jemných zrn. Tvorba nekovových vměstků, zejména oxidů, je potlačena způsobem plnění forem. Kov stoupá usměrněně z kelímku umístěného pod formou plnicí trubici do formy. V tomto uspořádání je pouze povrch roztaveného kovu v trubici v kontaktu s atmosférickým vzduchem. Regulace rychlosti plnění v závislosti na geometrii zajišťuje plnění s nízkou turbulencí. Čelní oblast tekoucího kovu část zůstává uzavřená, zatímco roztavený kov proudí do formy zespodu. Nízká turbulence při proudění kovu znemožňuje oxidům, aby se z povrchu snadno zamíchaly do objemu kovu. [10]



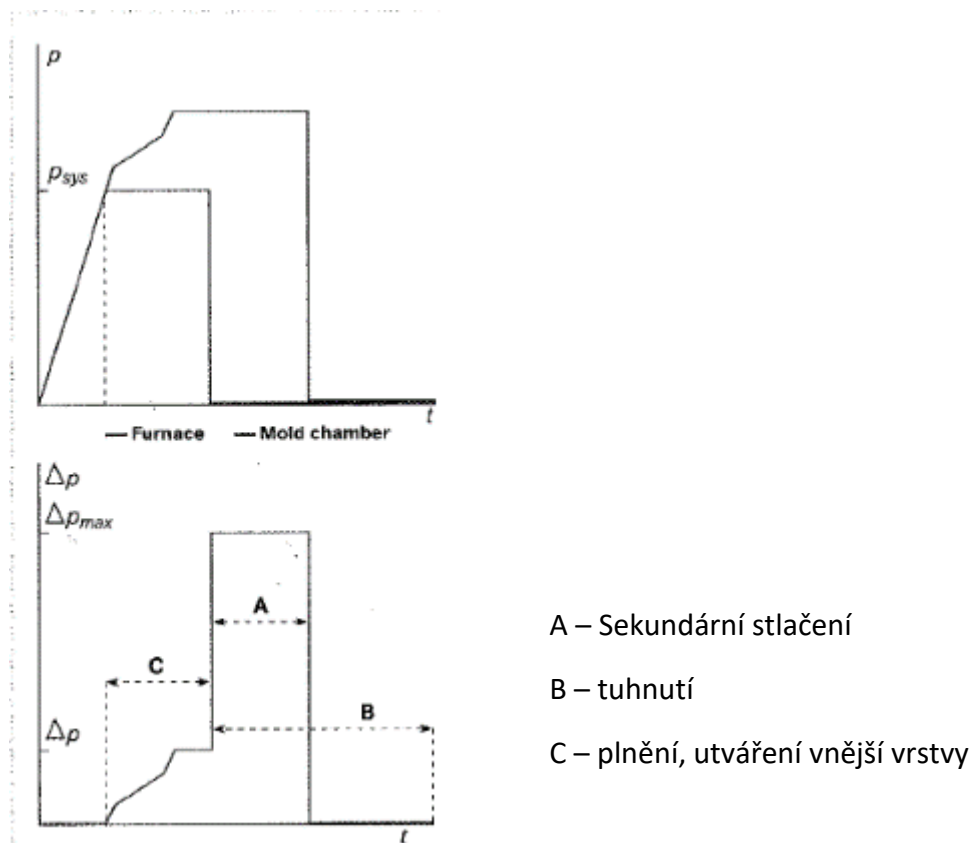
Obr. (2.5). 13 - Licí stroj CPC 1600

S ohledem na zlepšení mechanických vlastností je ještě důležitější omezit vnitřní vady obsažené v mikrostruktuře. Při lití hliníku jsou tyto vnitřní vady způsobeny dvěma efekty, a to precipitací rozpuštěných plynů na jedné straně a objemovým smrštěním kovu během přechodu z kapalně do pevné fáze na druhé. [10]

Jediný plyn, který je v hliníku v pozoruhodné míře rozpustný, je vodík. Rozpustnost vodíku závisí na teplotě. Ta se během ochlazování při přechodu do pevného stavu prudce snižuje. V důsledku toho se plynný vodík vysráží a naruší kovovou mikrostrukturu ve formě bublin, které snižují mechanickou pevnost odlitku. [10]

S využitím technologie CPDC je tavenina vystavena tlaku výrazně vyššímu, než je atmosférický, a to během celého lícího cyklu. To zabrání srážení rozpuštěného vodíku, a tudíž tvorbě bublin ve ztuhlém kovu. Podobně jako rozpustnost vodíku, také hustota kovu se náhle změní, jakmile dojde ke ztuhnutí. To má za následek změnu objemu, který musí být průběžně kompenzován přiváděním tekutého kovu. Avšak charakteristiky tuhnutí kovu a geometrie odlévání omezují možnost dalšího dosazování. [10]

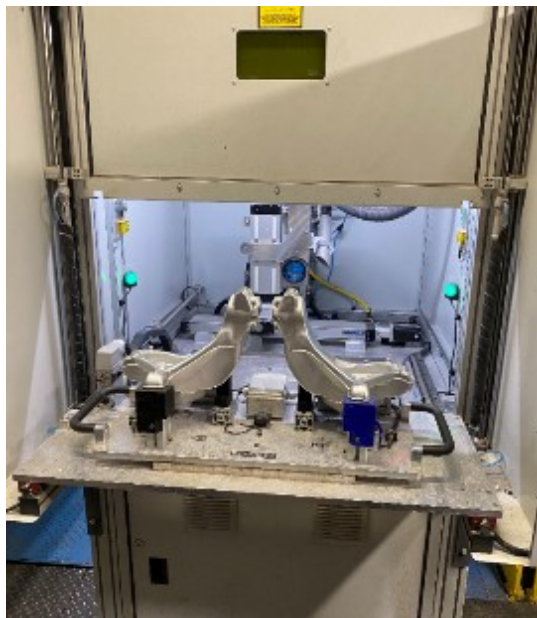
U tradičního nízkotlakého lití do trvalé formy je snaha prodloužit dobu dosazování kovu pomocí dostatečně velkých nálitků. U metody CPDC lze proces nálitkování mnohem efektivněji regulovat pomocí tlaku v systému přímo na licím stroji. Průměrný tlak 3 bary by odpovídal metalostatickému tlaku 11 m vysokého sloupce kovu u nízkotlakého lití. To ukazuje, že proces CPC s přidavným tlakem poskytuje nejen metalurgické výhody. V mnoha případech je možné zcela vynechat složitou vtokovou soustavu, nebo některé nálitky. To umožňuje dosáhnout využití tekutého kovu více než 95 %. [10]



Obr. (2.5). 14 - Křivky tlaku během licího cyklu [11]

2.5.2.4. Značení

Každý odlitek musí být označený specifickým QR kódem kvůli dohledatelnosti historie dílů pomocí automatického laserovacího zařízení.



Obr. (2.5). 15 - Laserovací zařízení

2.5.2.5. Ostřížení

Každý odlitek musí být ostříhnutý z důvodu odstranění přetoků v dělicí rovině pomocí střížníku.



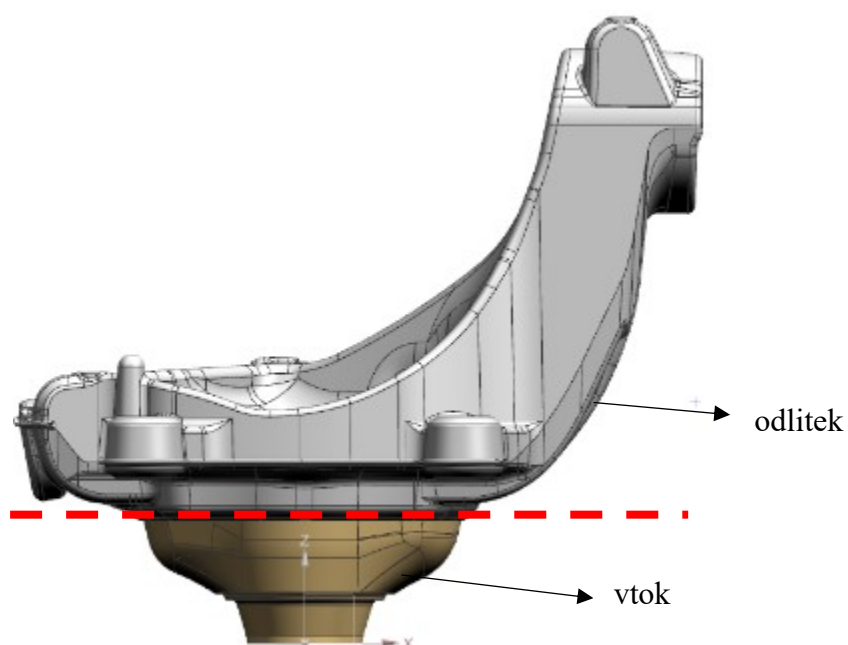
Obr. (2.5). 16 - Střížník

2.5.2.6. Řezání

Každý odlitek musí být pomocí automatické pily zbaven vtoku.



Obr. (2.5). 17 - Automatická pila

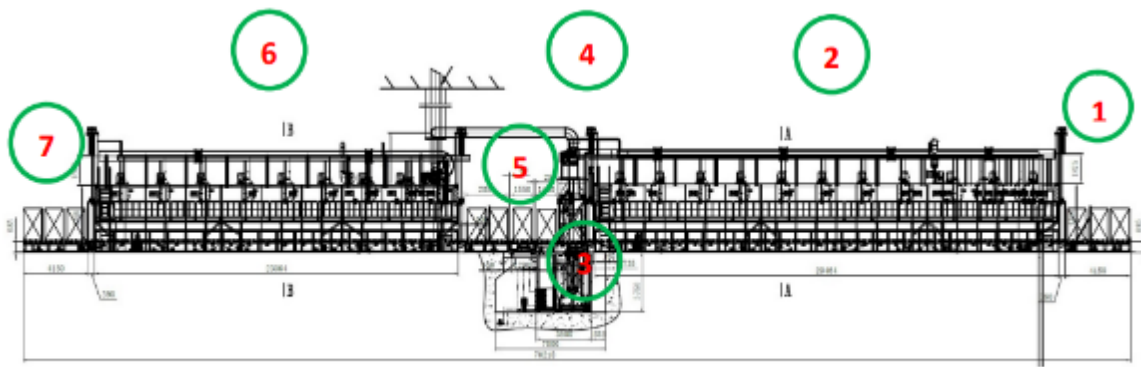


Obr. (2.5). 18 - Modelové zobrazení směru řezu

2.5.2.7. Žíhání

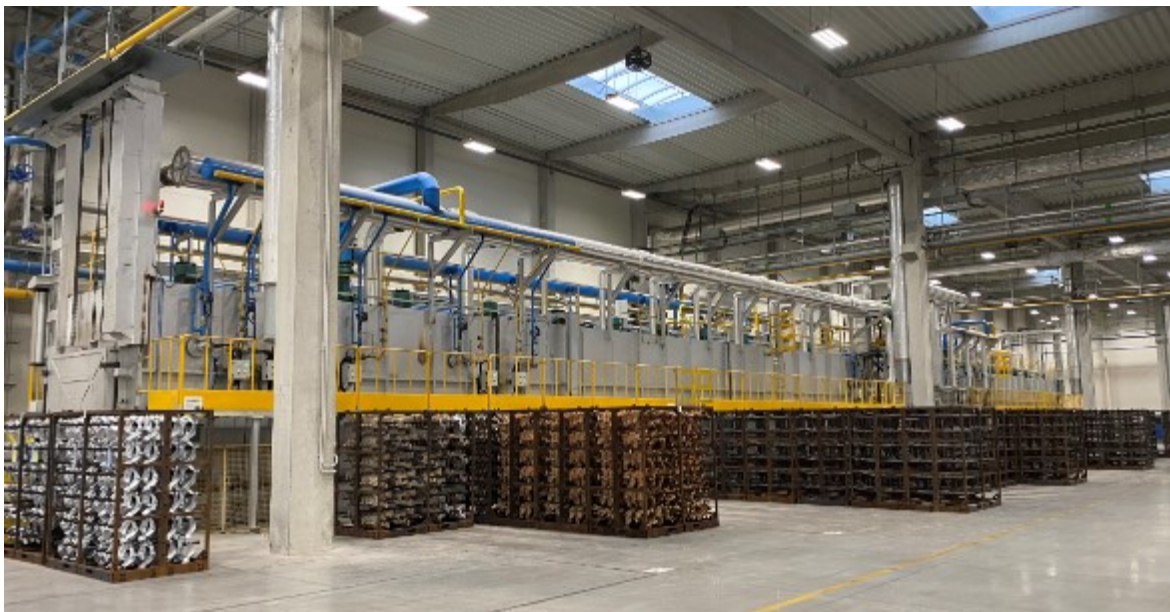
Doporučené parametry pro tepelné zpracování slitin AlSi7Mg0,3 jsou: [1]

- Rozpouštěcí žíhání při teplotě 535 – 540 °C po dobu 12 hod.
- Kalení do vodní lázně
- Umělé stárnutí při teplotě 150 – 155 °C po dobu 2 – 5 hod.



Obr. (2.5). 19 - Schéma žíhací pece

Popis schématu žíhací pece: 1. Nakládací dopravník, 2. žíhací pec, 3. kalící lázeň, 4. výtah kalící lázně, 5. vykládací dopravník po kalení, 6. vytvrzovací pec, 7. vykládací dopravník



Obr. (2.5). 20 - Žíhací pec

Žíhání je zohledňováno dle příručky CQI-9, která zahrnuje doporučení pro procesní parametry žíhání, přesuny mezi žíháním a chladicí lázní, délky pobytu v lázni apod.

2.6. Běžné vady odlitků litých technologií LPDC / CPDC

Cílem této kapitoly je seznámení s vadami odlitků, se kterými je možné se běžně setkat při výrobě odlitků technologií LPDC i CPDC. V této teoretické části budou tedy popsány pouze vady, které jsou vyhodnocovány v experimentální části práce.

Tyto vady lze rozdělit do hlavních kategorií podle národní normy vad ČSN 42 1240:

- Bubliny (Skupina 410)
- Staženiny (Skupina 440)
- Trhliny (Skupina 310) a praskliny (Skupina 320)
- Vady mikrostruktury (600)
- Vady chemického složení a vlastností odlitků (Skupina 700)

2.6.1. Bubliny

Bublinami se rozumí dutiny v odlitku. Mohou být otevřené – vystupující napovrch, nebo uzavřené - uvnitř odlitku. Vyskytují se buď jako jednotlivé bubliny, nebo ve shlucích, anebo jsou rozloženy po celém povrchu odlitku – tzv. síťové bubliny. Bubliny uzavřené mají povrch čistý, hladký nebo oxidovaný. Otevřené bubliny jsou pokryty vrstvou oxidů následkem styku slitiny s atmosférickým vzduchem během tuhnutí a chladnutí odlitku. Velikost a tvar bublin je rozmanitý, převládají bubliny kulového tvaru. Velikost může být od několika desetin milimetru až po desítky milimetrů. [12]

Bubliny zohledněné v této práci lze rozdělit z hlediska příčin vzniku:

- Bubliny způsobené vodíkem (412)
- Zuhlčený plyn (414)

Bubliny způsobené vodíkem (412) - jsou vodíkové endogenní bubliny (viz obrázek 2.6.1), které vznikají při tuhnutí slitiny v odlitku následkem přesycení taveniny rozpuštěným vodíkem. Hlavním zdrojem vodíku je vlhkost v pecní atmosféře, ve vsázce, v odplynovacích solích, ve vyzdívkách, nebo špatně vysušených kelímcích. Zdrojem vodíku může být i znečištěná nebo zamaštěná vsázka, popř. nevhodné mazadlo. [12]



Obr. (2.6). 1 – Rentgenový snímek plynové bubliny

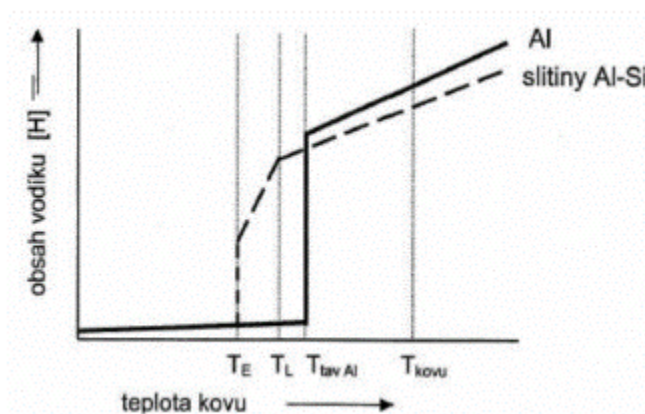
Vodní pára způsobuje vznik vodíkových bublin podle rovnice:



Vodík se uvolňuje i z hydroxidů, které se tvoří na zoxidovaném povrchu v podobě $\text{Al}(\text{OH})_3$, ze kterých se uvolňuje dle rovnice:



Rozpustnost vodíku v roztaveném hliníku oproti hliníku v tuhém stavu je značná a výrazně roste s teplotou.



Obr. (2.6). 2 - Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a ve slitinách Al-Si [12]

V roztaveném kovu může být přítomen vodík maximálně do obsahu, který odpovídá křivce jeho rozpustnosti.

Rozpustnost vodíku v tavenině je dána vztahem:

$$\log S = \frac{1}{2} \log p_{H_2} - A/T + B \quad (6)$$

S - rozpustnost vodíku v tavenině ($\text{cm}^3 / 100 \text{ g}$);

p_{H_2} - parciální tlak vodíku v okolní atmosféře (kPa);

T - teplotu kovu (K);

A, B - konstanty pro daný kov.

Vodík se z taveniny v průběhu krystalizace vylučuje ve formě pórů a bublin, které značně snižují mechanické vlastnosti odlitků. Bubliny bývají pokryty vrstvou Al_2O_3 .

Pro celkové množství vodíku rozpuštěného v tavenině platí Sievertsův zákon ve tvaru (7). Rozpustnost vodíku při daném tlaku závisí na parciálním tlaku vodíku v okolní atmosféře. Bubliny z plynů rozpuštěných v hliníku totiž vznikají, jestliže tlak rozpuštěných plynů převyší odpory působící proti nim. Vlivu tlaku na rozpustnost se využívá při odplynování.

$$S = \sqrt[k]{p_{H_2}} \quad (7)$$

S - rozpustnost vodíku v tavenině ($\text{cm}^3 \cdot 100 \text{ g}^{-1}$)

k - součinitel úměrnosti

p_{H_2} - parciální tlak vodíku v okolní atmosféře (kPa)

Slitiny hliníku bývají také znečištěny různými mechanickými částicemi – vměstky. Na vměstky se vážou hlinitanové komplexy obsahující vodík. Vytvářejí se tak podmínky pro vznik bublin na cizím zárodku. Podmínky pro vznik bubliny na cizím zárodku jsou určeny velikostí povrchového napětí mezi taveninou, cizí částicí (vměstkem) a plynem.

Vzniklé póry se nejčastěji vyskytují v místech, které jsou posledními místy odlitku, kde dochází k tuhnutí. Tvar a poloha pórů závisí na obsahu plynu a na rychlosti tuhnutí. Při pomalém tuhnutí vznikají velké bubliny, při rychlém tuhnutí vznikají mikrobubliny. Čím rychlejší je ochlazení, tím se vyloučí méně plynného vodíku, a tím je menší pórovitost.

Snížení obsahu H_2 v tavenině před odléváním se provádí pomocí odplynění a rafinací. Za odplyněné taveniny se považují taveniny s obsahem $0,1 - 0,15 \text{ cm}^3 H_2/100 \text{ g Al}$.

Zahlcený plyn (414) – vzniká, když je forma naplněna za velmi špatných podmínek, například může být v proudu kovu unášen vzduch v podobě bubliny a poté „uvězněn“ uvnitř kovu při tuhnutí. Uvězněný plyn vytváří dutiny s hladkými, zaoblenými stěnami ve tvaru zploštělých a rozměrných bublin. Tato vada se vytváří na povrchu odlitku a je ve většině případů otevřená. Tyto bubliny se vyskytují jednotlivě, nebo ve shlucích. Vada bývá způsobená nevhodnou konstrukcí formy a to zejména nedostatečným odvzdušněním formy a jádra. Je tedy nutné zajistit, aby byly při odlévání vzduch a vznikající plyny vytlačeny tekutým kovem. Vysoká lící rychlost také přispívá k zahlcení plynů do tekutého kovu, protože plyny nemají čas uniknout. U technologie nízkotlakého lití také může docházet ke vzniku této vady vlivem prasklé stoupací trubice. Uzavřené bubliny obvykle vznikají v blízkosti vtoku. [13, 14]

Tyto různé typy bublin se liší svou velikostí, způsobem distribuce, vzdáleností pod povrchem kovu při lití a jeho morfologií.

2.6.2. Staženiny

Druhým typem defektu, který nyní musíme vzít v úvahu, jsou staženiny, které se běžně dělí na makro a mikrostaženiny. Ve skutečnosti neexistuje žádný zásadní rozdíl mezi těmito dvěma formami staženin - jedna se postupně mění na druhou v závislosti na intervalu tuhnutí slitiny. [13, 14]

Staženiny zohledněné v této práci lze rozdělit z hlediska příčin vzniku:

- Otevřené staženiny (441)
- Vnitřní uzavřené staženiny (442)
- Řediny (443)
- Povrchové propadliny (445)

Otevřené staženiny (441) – staženiny vystupující na povrch s hrubě krystalickým zoxidovaným povrchem zasahují do určité hloubky v odlitku. Tyto vady se mohou nacházet pod nálitkem po jeho odstranění, kdy část staženiny ještě zasahuje i do odlitku, nebo v místě tepelného uzlu, který nebyl nálitkován. Tento případ otevřené staženiny se však objevuje zřídka. Jelikož po naplnění formy dochází k okamžitému ztuhnutí povrchové vrstvy a staženina tak vzniká za podtlaku už jako uzavřená v tlustší stěně nebo uzlu.

Příčinou staženiny je nedostatečné objemové doplnění taveniny v době tuhnutí. Vada je způsobena nenálitkováním tepelného uzlu či tlustší stěny odlitku, nedostatečným objemem nálitku, nedolitím nálitku či opožděným dosazením. Velikost nálitků se stanovuje na základě výpočtů, nebo simulačních programů. Správným stanovením velikosti nálitku se dá předejít vzniku této vady. Na vznik může mít vliv i nedostatečný průřez nálitku, špatné umístění nálitku, i příliš vysoká teplota taveniny, či formy. [12,13]

Vnitřní uzavřené staženiny (442) - staženiny nepravidelného tvaru s vyloučenými dendrity rozdílných velikostí se mohou vyskytovat v místě tepelného uzlu, a to vždy v horní polovině (stěny, uzlu). Mají nepravidelný tvar způsobený rozdílnou intenzitou odvodu tepla od stěn formy, od pravých i nepravých jader a způsobem zaústění vtokové soustavy. [12]



Obr. (2.6). 3 - Rentgenový snímek staženiny

Za vnitřní staženiny lze považovat i řediny nacházející se pod hlavní soustředěnou staženinou v otevřeném nálitku, které zasahují až do odlitku. Největší výskyt těchto staženin je v místě zesílené tloušťky stěny, v zesílené přírubě či ve spoji stěn, tj. v místech tepelných uzlů odlitku, kde slitina tuhne později než v okolní oblasti. Jde o místa, která nejsou doplňována po celou dobu tuhnutí taveninou a ani nejsou zajištěna zvýšeným odvodem tepla chlazením formy. [12]

Nevhodná konstrukce odlitku může být hlavní příčinou vzniku vnitřních staženin. Za technologickou chybu se považuje nevhodná poloha odlitku ve formě, při níž je většina tepelných uzlů ve spodní části formy, nedostatečný objem a nevhodné umístění nálitků nad tepelnými uzly. Dále je to nevhodné umístění vtokové soustavy, nevyužití chladítek k odstranění odlehlého tepelného uzlu atd. Staženinám se dá do jisté míry předejít pomocí softwarové simulace průběhu tuhnutí. [12]

Vnitřní uzavřené staženiny je možné odhalit nedestruktivními zkouškami pomocí rentgenu, popř. ultrazvuku. Zcela průkazně lze vnitřní staženinu (místo, objem) určit rozřezáním odlitku. Této metody se využívá při rozběhu sériové výroby. Přibližně lze někdy tuto vadu určit podle propadliny na povrchu zesílené tloušťky stěny odlitku nebo nad tepelným uzlem. [12]

Zjištěná vnitřní uzavřená staženina bez porušení odlitku se neopravuje. Je na zvážení odborníků, zda se jedná o vadu přípustnou či nepřípustnou. Objeví-li se vada při opracování odlitku, jedná se o opravitelnou vadu, ale nákladnou. Proveďte se zavaření dutiny, je-li normami a technickými podmínkami dovoleno. [12]

Řediny (443) lze charakterizovat jako shluky drobných staženin, které se vyskytují v tepelných uzlech, nebo v tepelné ose odlitku. Řediny vznikají při konečné fázi tuhnutí. Řediny vytváří řídká místa ve stěně odlitku, z nichž mohou vycházet tenké kapiláry až na povrch. Takový odlitek je pak netěsný. Příčinou vzniku této vady je nedostatečné dosazování kovů během tuhnutí odlitku. [13]

Povrchové propadliny (445) jsou propadlá místa vyskytující se na povrchu odlitku, na horní ploše tepelně exponovaného místa, např. v tlusté nenalinkované části stěny nebo nad tepelným centrem uzlu několika stěn. Můžou se také vyskytovat na horní ploše otevřeného nálitku a na vrchlíku uzavřeného nálitku. Pod propadlinou může být menší, či větší uzavřená staženina, anebo ředina. [12]



Obr. (2.6). 4 - Povrchová propadlina

Při procesu lití, v okamžiku naplnění dutiny formy taveninou, dochází k přenosu tepla z odlitku do formy. Začíná proces tuhnutí, kdy se kolem celého povrchu odlitku vytvoří pevná vrstva kovu (licí kůra). Tepelný uzel tuhne delší dobu než ostatní části, a to je důvod pro vznik staženiny. Staženina se ještě dále zvětšuje, jelikož v době tuhnutí není napájeno toto místo taveninou. Hladina kovu v tvořící se staženině klesá a oddělí se od již ztuhlé horní vrstvy. Další její růst je přerušen. Podtlak ve staženině, který stahuje prohřátou povrchovou vrstvu dolů v době, kdy zvenčí na ztuhlou kůru působí atmosférický tlak, tak zapříčiní na vnější horní ploše odlitku vznik místní propadliny. Hloubka propadliny je závislá na velikosti staženiny a podtlaku v ní. [12,13]

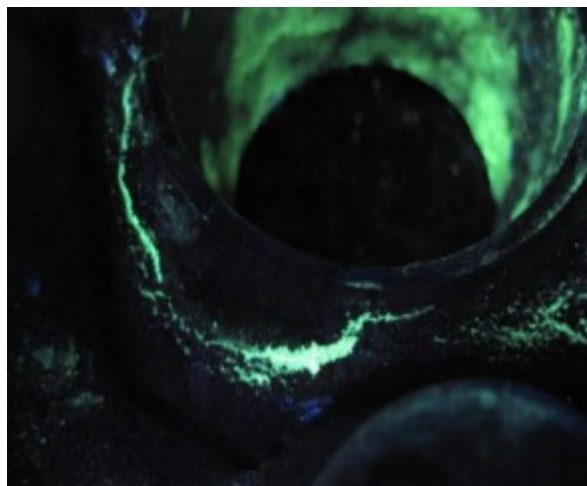
Propadliny mohou vzniknout ojediněle i u nálitků. Je to známka toho, že náletek nefunguje správně, kov v něm tuhne za podtlaku. Příčinou vzniku propadliny je špatná tepelná izolace hladiny nálitku okamžitě po odlití. Hladina totiž ztuhla rychleji a uzavřela spojení nálitku s atmosférou. [12]

2.6.3. Trhliny a praskliny

Trhliny zohledněné v této práci lze rozdělit z hlediska příčin vzniku:

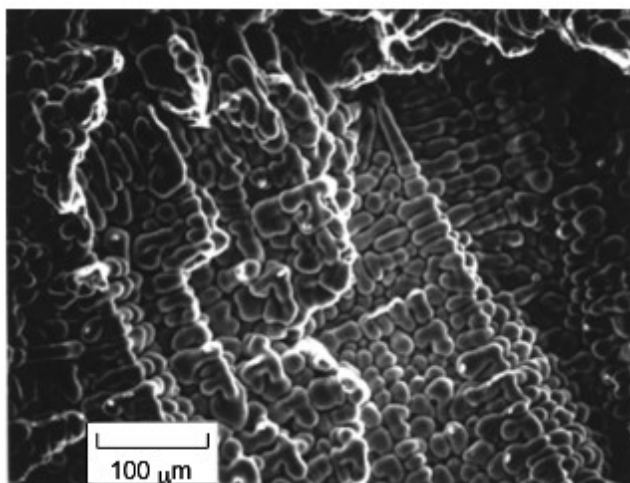
- Povrchové trhliny (311)
- Vnitřní trhliny (313)

Povrchové trhliny (311) jsou jasně viditelné vady odlitku charakteristické svým křivolakým a zoxidovaným povrchem. Trhliny se tvoří na hranicích zrn. Povrchové trhliny vznikají zejména v tepelných uzlech odlitku. Vznik vady tohoto druhu je vyvolán tahovými a smykovými silami v závislosti na schopnosti materiálu odolávat těmto napětím. Povrchové trhliny jsou odhalitelné pomocí nedestruktivních metod testování (radiologická zkouška, fluorescenční zkouška). [13]



Obr. (2.6). 5 – Snímek povrchové trhliny indikované fluorescenční zkouškou

Vnitřní trhliny (313) jsou vady, které vznikají při chladnutí z vysokých teplot, nebo vznikají za nižších teplot při tepelném zpracování. Hlavní příčinou vnitřních trhlin jsou vysoké teplotní gradienty v průřezu odlitku, čímž dochází k rychlým změnám teplot, kde následkem jsou vysoká vnitřní pnutí. Je proto nutné snižovat teplotní rozdíly odlitku v průběhu celé výroby. [13]



Obr. (2.6). 6 - Pohled na povrch vnitřní trhliny pomocí elektronového mikroskopu [14]

Praskliny (320) se dále nedělí. Jedná se o rovné, nebo slabě zakřivené roztržení stěny odlitku, vzniklé za nízkých teplot. Praskliny vznikají napříč zrna. Povrch praskliny je většinou čistý a zrnitý, někdy mírně zoxidovaný. Praskliny vznikají díky vnitřnímu napětí odlitku, které je způsobeno velkými rozdíly teplot v různých částech odlitku při chladnutí. Nevhodné, z hlediska vzniku prasklin, jsou velké rozdíly tloušťky stěn odlitku. [13]



Obr. (2.6). 7 - Prasklina

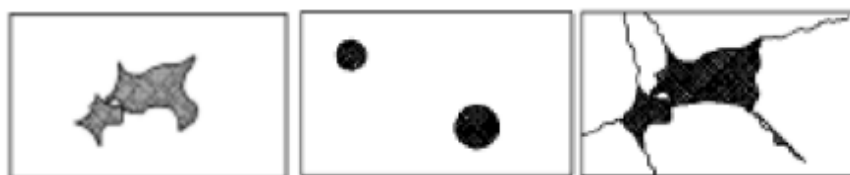
2.6.4. Vady mikrostruktury

Tato třída obsahuje 8 skupin vad, z nichž se skupina mikroskopických dutin dělí na 3 druhy vad. Ostatními skupinami jsou vměstky, nesprávná velikost zrna, nesprávný obsah strukturních složek, zatvrdlina, zákalka, obrácená zákalka, oduhličení povrchu a jiné odchylky od mikrostruktury. U těchto vad jde většinou o odchylky parametrů vlastností odlitků od sjednaných technických podmínek a norem a tedy nikoli o vady v pravém slova smyslu. K posuzování vad této třídy je nutné provést metalografické strukturní rozbor, protože konvenčním kritériem pro odlišení makrodefektu od mikrodefektu je rozlišovací schopnost lidského oka, která se udává mezní hodnotou 0,2 mm. Vady zatvrdlina, zákalka, obrácená zákalka a oduhličení povrchu jsou vady především litin a nebudou v této práci posuzovány [12].

Mikroskopické dutiny (610) jsou definovány jako vnitrokrystalové a mezikrystalové, prostým okem neviditelné dutiny a porušení souvislosti odlitku, které neodpovídají požadavkům norem a technických podmínek. Tato skupina vad se dělí na mikrostaženiny, mikrobubliny a mikrotrhliny.

Uvedené vady mají do značné míry stejný mechanismus vzniku, který spočívá v nukleaci a růstu vady až po jistý mezní rozměr, který leží pod rozlišovací schopností lidského oka. Mikrostaženiny, mikrobubliny a mikrotrhliny se navzájem odlišují tvarem a fyzikální podstatou vzniku.

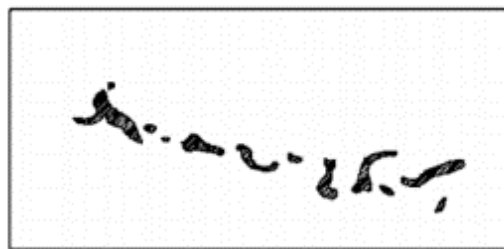
U mikroskopických dutin je třeba se řídit stejnými opatřeními jako u těchto makroskopických vad. Je tedy důležité zajistit usměrněné tuhnutí odlitků pomocí nálitků a chladítek, dolévat nálitky a snížit lící teplotu, upravit složení formovacích směsí a jejich vlhkost, zlepšit prodyšnost forem a jader a například zmenšit rozdíly v tloušťkách jednotlivých částí odlitků.



Obr. (2.6). 8 - Schéma vady – mikrostaženiny, mikrobubliny, mikrotrhliny [12]

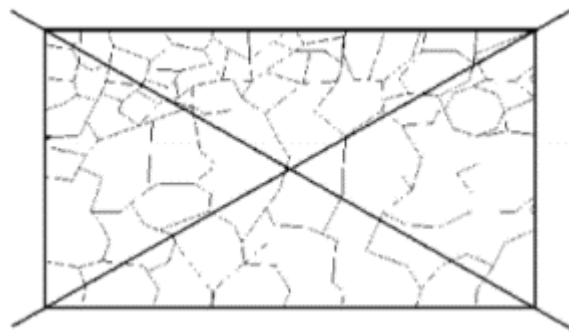
Vměstky (620) - Touto vadou se rozumí mikročistota, která neodpovídá požadavkům sjednaným technickými přejímacími podmínkami. Mikročistota se vyjadřuje množstvím, velikostí, tvarem a rozložením nekovových vměstků (oxidů, sulfidů a nitridů).

Při posuzování příčin vzniku vměstků v odlitcích ze slitin hliníku je třeba vycházet z jejich původu, který může být exogenní - kdy jsou do slitiny vměstky vnášeny působením okolního prostředí, nebo endogenní – ty vznikají vnitřními procesy během tavby, lití, tuhnutí a chladnutí odlitku. Exogenní vměstky mohou být makroskopických a méně často mikroskopických rozměrů. [12]



Obr. (2.6). 9 - Schéma vady – vměstky [12]

Nesprávná velikost zrna (630) - představuje odchylky velikosti zrna od sjednaných technických přejímacích podmínek nebo od norem. Zpravidla se jedná o hrubé zrna. [12]



Obr. (2.6). 10 - Schéma vady – nesprávná velikost zrna [12]

Nesprávný obsah strukturálních složek (640) znamená odchylku v druhu, množství, velikosti, tvaru nebo rozložení strukturních složek od ustanovení norem, nebo sjednaných technických přejímacích podmínek. [12]

2.6.5. Vady chemického složení a vlastností odlitků

Tato třída vad představuje odchylky od daných norem a sjednaných technických podmínek. Tyto vady jsou zastoupeny nejmenším podílem mezi vyrobenými zmetky (neshodnými díly). Vady zohledněné v této práci lze rozdělit z hlediska příčin vzniku: [13]

- Nesprávné chemické složení (710)
- Odchylky hodnot mechanických vlastností (720)

Nesprávné chemické složení (710) může být způsobeno nesprávným výpočtem vsázky, dobou tavby nebo nesprávným průběhem tavby materiálu. Je detekováno pomocí spektrální analýzy materiálu. [13]

Odchylky hodnot mechanických vlastností (720) jsou způsobovány nesprávným chemickým složením, nevhodným průběhem tavby nebo nesprávným tepelným zpracováním. Výsledky mechanických vlastností jsou získávány z výsledků normalizovaných zkoušek. [13]

2.7. Testování vlastností a kvality

Cílem této kapitoly je popis metod, kterých bylo v experimentální části využito pro analýzu vlastností a kvality odlitků porovnávaných technologií.

Testy jsou rozděleny do dvou hlavních kategorií:

- a) Nedestruktivní
- b) Destruktivní

2.7.1. Nedestruktivní testování

Nedestruktivní testování (NDT), nebo také defektoskopie zahrnuje soubor metod, které jsou na základě měřitelných, nebo sledovatelných fyzikálních jevů schopny odhalit vady ve výrobku bez jeho porušení nebo poškození. Výrobek není při defektoskopické kontrole poškozen, a pokud splňuje požadavky na jakost, je možné jej ihned použít.

Úlohou a cílem defektoskopie (NDT) je prokázat a potvrdit, že zkoušený výrobek nemá nepřípustné vady. Pokud se během NDT prokáže přítomnost nepřípustných vad/defektů, potom výrobek není možné použít k danému účelu. Musí být opraven nebo vyzmetkován. Nepřípustnost vad se stanovuje empiricky - na základě zkušeností, nebo na základě zákaznických požadavků. Dalším možným způsobem je využití výpočtů, modelování a ověřovacích zkoušek.

Běžné NDT metody jsou: vizuální kontrola, kapilární metoda, magnetická prášková metoda, radiologická metoda, ultrazvuková metoda, metoda vířivých proudů, zkoušení těsnosti, infračervená defektoskopie.

Z NDT metod byly pro analýzu v experimentální části využity tyto:

- rentgenová metoda
- kapilární (fluorescenční) metoda

Rentgenová metoda - Zkouška prozařováním rentgenovým zářením je založena na schopnosti krátkovlnného záření pronikat materiálem, na jeho zeslabení absorpcí v materiálu. Je-li v odlitku vnitřní vada, je v tomto místě skutečná tloušťka kovu menší o rozměr vady ve směru záření. Vada se projeví na snímku jako tmavá vrstva na světlejším pozadí. Při zkoušce rentgenovým zářením se používají rentgenové přístroje.

Vyhodnocení této metody může probíhat podle různých norem. Pro účely této práce bude zmíněna americká norma ASTM:

- ASTM E1000 - standardní příručka pro radioskopii
- ASTM E1255 - standardní praxe pro radioskopii
- ASTM E1411 - standardní praxe pro kvalifikaci radioskopických systémů
- ASTM E1734 - standardní praxe pro radioskopickou zkoušku odlitků
- ASNT NDT pro radiografické testování

Touto metodou jsme schopni odhalit na základě této normy ASTM vnitřní vady odlitku:

- Cizí materiál menší hustoty 1/4in(6,35mm – 12,7mm)
- Cizí materiál menší hustoty 3/4in(12,7mm – 51 mm)
- Cizí materiál větší hustoty 1/4in (6,35mm – 12,7mm)
- Cizí materiál větší hustoty 3/4in (12,7mm – 51 mm)
- Plynové bubliny 1/4in (6,35mm – 12,7mm)
- Plynové bubliny 3/4in (12,7mm – 51 mm)
- Porozita - podlouhlé bubliny 1/4in (6,35mm – 12,7mm)
- Porozita - podlouhlé bubliny 3/4in (12,7mm – 51 mm)
- Porozita - oblé bubliny 1/4in (6,35mm – 12,7mm)
- Porozita - oblé bubliny 3/4in (12,7mm – 51 mm)
- Dutiny vzniklé chladnutím 1/4in (6,35mm – 12,7mm)
- Staženiny 1/4in (6,35mm – 12,7mm)
- Staženiny 3/4in (12,7mm – 51 mm)

Kapilární metoda (fluorescenční) – Na zkoušený předmět je nanесena indikační tekutina (fluorescenční kapalina). Potom se opláchne, osuší a je pozorován v temné komoře pod ultrafialovým zářením. Má-li zkoumaný předmět povrchové vady, vystupuje vlivem vztlínivosti tekutina z defektu na povrch, kde se rozzáří vlivem ultrafialového záření v podobě indikace odpovídající velikosti vady.

Vyhodnocení zkoušky je subjektivní, proto může být vyhodnocena pouze patřičně kvalifikovanou osobou podle normy ISO 9712, PT level 2 patřičného sektoru.

Prostor pro vyhodnocení zkoušky má předepsanou maximální hodnotu intenzity osvětlení bílého světla vyjádřenou v jednotkách lux [lx] – fotometrická jednotka intenzity osvětlení způsobené světelným tokem jednoho lumenu dopadajícím na plochu jednoho metru čtverečního a minimální hodnotu ultrafialového světla $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.



Obr. (2.7). 1 - Odlitek nasprejovaný fluorescenční kapalinou pod denním světlem (vlevo) a pod ultrafialovým světlem (vpravo)

Touto metodou jsme schopni odhalit povrchové vady a podpovrchové vady vystupující na povrch: staženiny, propadliny, trhliny, praskliny, vměstky.

2.7.2. Destruktivní testování

Destruktivní testování slouží k vyhodnocení mechanických, mikrostrukturálních a chemických vlastností materiálu, přičemž dojde k porušení nebo poškození výrobku.

2.7.2.1. Zkoušky mechanických vlastností

Druhy zkoušek mechanických vlastností materiálů Z hlediska působení síly na zkušební těleso rozdělujeme mechanické zkoušky na:

- **Statické zkoušky**, při nichž zatížení zvětšujeme poměrně zvolna. Působí obvykle minuty, při dlouhodobých zkouškách dny až roky.
- **Dynamické zkoušky rázové a cyklické**, při kterých působí síla nárazově po zlomek sekundy. Při cyklických zkouškách (zkoušky na únavu materiálu) se proměnné zatížení opakuje i mnoha cykly za sekundu až mnoha milionů jejich celkového počtu
- **Zvláštní technické zkoušky**, jejichž údaje je možné považovat za směrné, neboť výsledky zkoušek zde závisí na mnoha vedlejších činitelích. Z těchto zkoušek jsou nejdůležitější zkoušky tvrdosti. Podle teplot, při kterých zkoušky provádíme, je dělíme na zkoušky za normálních, vysokých a nízkých teplot.

Mechanické zkoušky se většinou neprovádějí na součásti, ale na zvláštních vzorcích zhotovených buď přímo ze součásti, nebo z téhož materiálu.

Zkouška tahem (trhací) – podle normy ČSN 42 0310 - je nejrozšířenější statickou zkouškou.

Je nutná téměř u všech materiálů, protože jí získáváme některé základní hodnoty potřebné pro výpočet konstrukčních prvků a volbu vhodného materiálu. Zkoušky tahem se zpravidla nedělají přímo na vyrobené součásti, ale na zkušebních tyčích, jejichž tvary a rozměry jsou normalizovány. Zkušební tyče mohou být kruhové nebo ploché, krátké nebo dlouhé. Zkušební tyče kruhové, krátké i dlouhé, se liší tvarem hlav. Volí se podle zkoušeného materiálu a upínacího zařízení trhacího stroje, které bývá výměnné. Vlastní měřená délka l_0 závisí na průřezu zkušební tyče a je při kruhovém průřezu tyče $10 d_0$ a u tyčí krátkých $5 d_0$ (d_0 = průměr zkušební tyče). Aby bylo možné měřit prodloužení zkušební tyče po přetržení, vyznačí se na ní před zkouškou rysky ve vzdálenosti 10 mm. Trhací zkouškou zjišťujeme pevnost v tahu, poměrné prodloužení tažnost a zúžení (kontrakci) zkoušeného materiálu.

U všech statických zkoušek vzniká v materiálu napětí. Je to míra vnitřních sil, které vznikají v materiálu působením sil vnějších. Číselná hodnota napětí se určí jako podíl síly a plochy, na níž síla působí. Rozeznáváme napětí normálové σ (tah, tlak, ohyb) a tečné (smykové) τ . Podíl síly a skutečné plochy průřezu v kterémkoliv okamžiku zkoušky se nazývá skutečné napětí σ . Běžně se však používá smluvní jmenovité napětí R , protože se neuvažuje změna průřezu tyče. Zatížení se proto vztahuje na počáteční průřez tyče S_0 .

Pevnost v tahu R_m (σ_{Pt}) je smluvní hodnota napětí daného podílem největší zatěžující síly F_m , kterou snese zkušební tyč a původního průřezu tyče S_0 .

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (\text{MPa}) = (\text{N/mm}^2) \quad (8)$$

Byla-li původní délka zkušební tyče L_0 a délka zjištěná po přetržení L_u , je celkové (absolutní) prodloužení (změna délky):

$$\Delta L = L_u - L_0 \quad (9)$$

Tažnost A je poměrné prodloužení v procentech počáteční délky:

$$A = \varepsilon \cdot 100 \quad (\%) \quad (10)$$

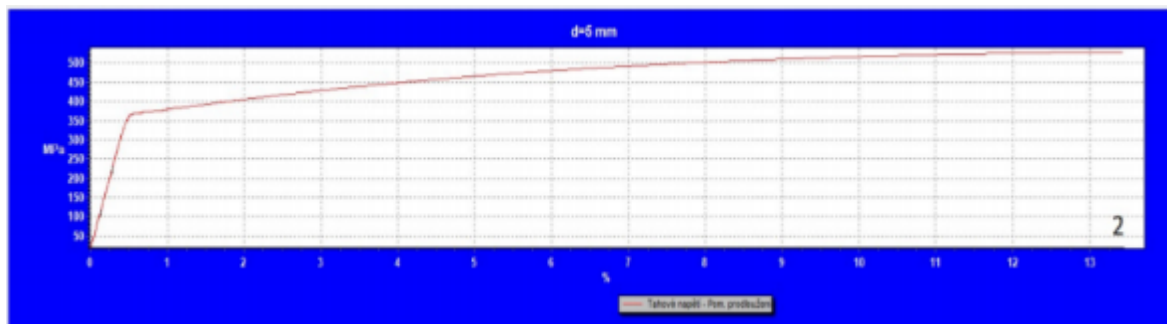
Uvádí se s indexem (A_5 , A_{10}) podle toho, zda byla získána na krátké nebo dlouhé tyči.

Pevnost v kluzu R_e (mez pevnosti v kluzu) je napětí, při němž se zkušební tyč počne výrazně prodlužovat, aniž by stoupala zatěžující síla, nebo při němž nastává prodlužování doprovázené poklesem zatěžující síly.

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \quad (\text{MPa}) \quad (11)$$

U některých materiálů prodleva nenastane a mez kluzu nelze zjistit. Proto jako běžnou smluvní hodnotu bereme napětí, které způsobí trvalé prodloužení 0.2%. Zjišťuje se graficky nebo průtahoměry. Tato smluvní hodnota se označuje jako $R_{p0,2}$.

Trhací zařízení je propojené se softwarem v připojeném počítači, který zaznamenává tyto 3 hlavní veličiny: mez pevnosti (R_m), mez kluzu (R_e) a tažnost (A). Výsledkem zkoušky je tahový diagram (závislost zátěžového napětí na prodloužení), ze kterého lze vyhodnotit mechanické vlastnosti.



Obr. (2.7). 2 - Tahový diagram

Zkouška tvrdosti podle Brinella podle normy ČSN EN 10003-1 - se používá především pro zkoušení tvrdosti měkké oceli, šedé litiny, neželezných kovů (Cu, Sn, Pb, Al) a jejich slitin. Tvrdost zjišťujeme vtlačováním kalené ocelové kuličky o průměru $D = 10, 5, 2,5, 1$ mm rovnoměrně stupňovanou silou $F = 300 D^2, 100 D^2, 50 D^2, 25 D^2$ N, po dobu $t = 10, 30, 60, 120, 180$ s, do lesklé rovné plochy zkušebního vzorku nebo zkoušené součásti. Zkouší se na Brinellově tvrdoměru. Tvrdost určujeme podle průměru vtisku, který měříme dvakrát (kolmo na sebe), abychom vyloučili chyby vzniklé nepřesností vtisku. Pro praktickou potřebu jsou sestaveny tabulky, ve kterých podle průměru vtisku d a velikosti použité síly F najdeme přímo odpovídající tvrdost.

Označení tvrdosti:

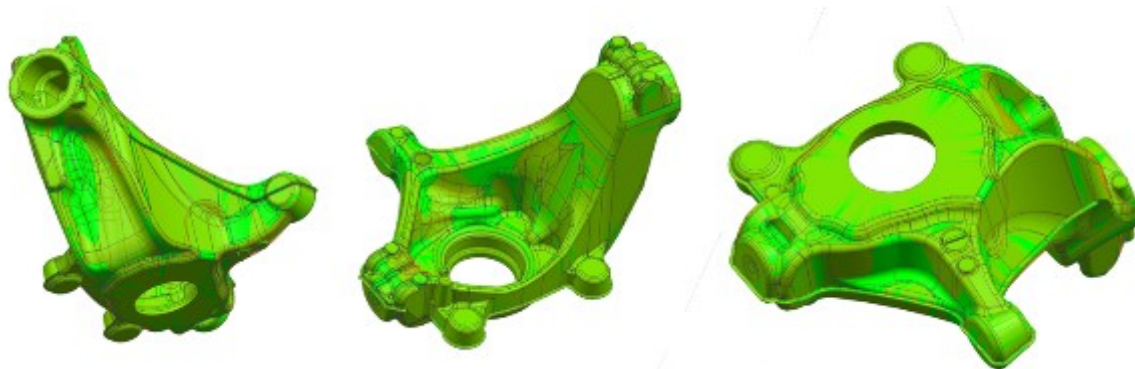
180HB/5/7500/30

Pro nejběžnější podmínky, tj. HB 10/30 000/10 se používá označení 200 HB.

Přesnost měření závisí na správném proměření vtisku a drsnosti povrchu měřeného předmětu. U Brinellové zkoušky je toto proměření obtížné a nepřesné, což je její nevýhodou. Vtisk bývá někdy nezřetelný a nesouměrný. Na průměr vtisku má velký vliv i vtažení materiálu po okraji vtisku (u materiálů neztvrdnutého) nebo naopak vytlačení obvodového valu (u ztvrdnutého materiálu).

3. Experimentální část

Cílem experimentální části je porovnání technologie nízkotlakého lití a technologie nízkotlakého lití s protitlakem prostřednictvím vyhodnocení vad odlitků litých jednou i druhou technologií, mechanických zkoušek, mikrostrukturální a chemické analýzy odlitků.



Obr. (3.0). 1 - Model porovnávaného odlitku

Pro snadnější orientaci v porovnávaných odlitcích bude použito vlastní názvosloví - odlitky vyrobené technologií CPDC označíme jako „C“ a odlitky vyrobené technologií LPDC „L“.

3.1. Specifikace porovnávané součásti

Parametry odlitku:

- Váha odlitku včetně vtoku: 5,32 kg
- Váha odlitku po odřezání vtoku: 4,35 kg



Obr. (3.1). 1 - Odlitek použitý pro srovnání

Parametry formy:

Materiál: H13 vysoce legovaná ocel Cr-Mo-V

Počet dutin (počet odlitků z 1 lícího cyklu): 6

Počet plnicích trubic: 6 (slouží zároveň jako vtoková soustava)

Chladicí médium: voda



Obr. (3.1). 2 - Spodní část formy

Podmínky výroby a zpracování odlitků:

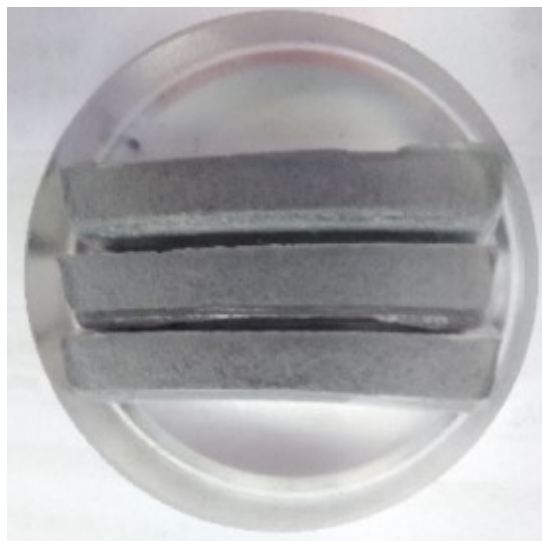
Veškeré procesní zpracování odlitků vyrobených oběma technologiemi byly provedeny za stejných / velmi podobných podmínek pro co nejlepší srovnatelnost těchto dvou metod.

- odlité z jednoho tavicího kelímku - tavenina s totožným chemickým složením i mírou naplynění.
- odlité na stejném lícím stroji, do stejné formy, se stejnými technologickými parametry (chlazení, čas plnění)
- odlité za různých podmínek tlakování (CPDC s použitím dotlaku, LPDC bez použití dotlaku)
- vytvrzované ve stejné žíhací peci, v jedné žíhací dávce

3.2. Vyhodnocení naplynění taveniny:

Při odplynění taveniny použité pro odlitý testovaných vzorků byly provedeny zkoušky popsané v kapitole (2.5.2.2) teoretické části – K-MOLD test a RTP test.

Výsledek K-MOLD testu byl OK – tedy vyhovující bez vad.



Obr. (3.2). 1 - Vzorek pro vyhodnocení K-MOLD testu

Naměřená hodnota RTP testu byla $2,65 \text{ g.cm}^{-3}$ – výsledek byl OK, tedy vyhovující.



Obr. (3.2). 2 - Vzorek pro vyhodnocení RTP testu

3.3. Vyhodnocení nedestruktivních zkoušek

3.3.1. Rentgenová zkouška

Snímky byly pořizovány v automatickém režimu rentgenového zařízení OMNIA pomocí softwaru FARIS s funkcí ADR (Automatic Defect Recognition) zodpovědného za automatické vyřazení neshodných výrobků, ve kterém jsou předdefinovaná kritéria přípustných vad podle americké normy ASTM.

Všechny odlitky byly snímány ze tří různých úhlů pro 100% zajištění odhalení vad, které by pod jedním úhlem nemusely být viditelné.

Snímky rentgenové zkoušky na obrázku 3.3.2 byly vybrány jako reprezentativní z celkového množství 50-ti snímaných odlitků C a 50-ti odlitků L, které byly označené drátem viditelným na snímcích pro snížení rizika zamíchání těchto testovacích kusů do sériové výroby.



Obr. (3.3). 1 - Rentgenové zařízení OMNIA 160-100



Obr. (3.3). 2 - Rentgenové snímky odlitků C (vlevo) a L (vpravo)

Tab. (3.3). 1 - Tabulka výsledků rentgenové zkoušky

Technologie výroby	Počet shodných odlitků	Počet neshodných odlitků
CPDC	50 z 50	0 z 50
LPDC	50 z 50	0 z 50

Z výsledků radiologické zkoušky je patrné, že pokud má režim upraveného tlakování strojů CPC vliv na kvalitu těchto odlitků, jsou touto metodou testování nedetekovatelné, jinými slovy se od sebe neliší kvalita odlitků **C** a odlitků **L** na základě tohoto vyhodnocení.

3.3.2. Fluorescenční zkouška

Zkouška byla provedena v automatické penetrační lince. Odlitky byly nejprve navěšeny na háky po čtyřech kusech na hák, které se pohybují rychlostí 4,5 m/min. V prvním kroku je na odlitky nanášena fluorescenční kapalina pomocí trysek. V druhém kroku, jakmile fluorescenční kapalina penetruje do všech míst, kde je povrch odlitku jakýmkoliv způsobem narušen, je odlitek zbaven fluorescenční kapaliny pomocí vodních trysek. Veškerá fluorescenční kapalina z povrchu, který není narušený, se tímto očistí a zůstane pouze v místech, kde je indikace některé vady. Ve třetím kroku jsou odlitky ofoukány teplým vzduchem pro zbavení povrchu vody. V posledním kroku odlitky vjíždí do temné kabiny, kde je předepsaná maximální hodnota světelné intenzity 20 lx bílého světla a minimální hodnota 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Právě v této kabině, kde je prakticky tma, jsou odlitky ozářeny ultrafialovým světlem a vizuálně vyhodnocovány.

Vyhodnocení fluorescenční zkoušky vykonal NDT specialista, který je k tomuto úkonu kvalifikovaný. Kritéria pro vyhodnocení jsou určena zákazníkem prostřednictvím katalogu vad.

Tab. (3.3). 2 - Tabulka výsledků fluorescenční zkoušky

Technologie výroby	Počet shodných odlitků	Počet neshodných odlitků
CPDC	50 z 50	0 z 50
LPDC	50 z 50	0 z 50

Z výsledků fluorescenční zkoušky je patrné, že pokud má režim upraveného tlakování strojů CPC vliv na kvalitu těchto odlitků, jsou touto metodou testování nedetekovatelné, stejně jako u rentgenové metody.

3.4. Vyhodnocení mechanických zkoušek

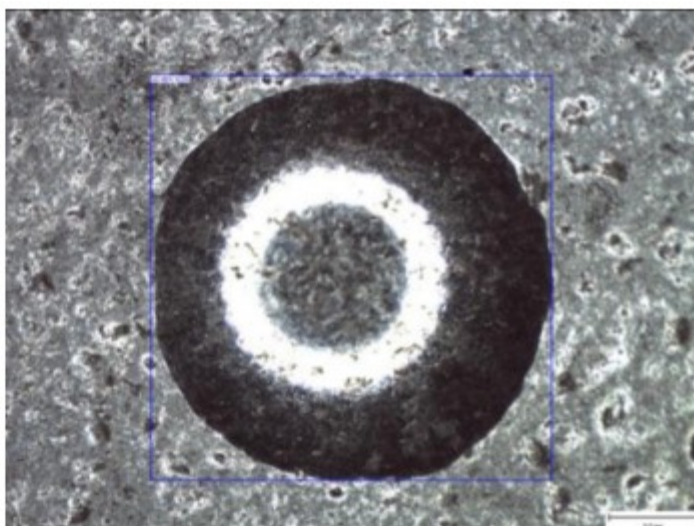
Odlitky určené k testům mechanických zkoušek byly vybrány z rohových pozic žíhacího koše. Tato místa mají největší předpoklad k selhání mechanických zkoušek na základě simulačních programů (viz. obr. 3.4.1). Celkově bylo testováno 12 odlitků **C** a 12 odlitků **L**. Všechny odlitky byly testovány v žíhaném stavu.



Obr. (3.4). 1 - Rozmístění testovacích kusů v žíhacím koši

3.4.1. Zkouška tvrdosti

Tvrдост byla měřena na odebraných vzorcích dle normy ČSN EN 10003-1 metodou měření tvrdosti podle Brinella na automatickém stacionárním tvrdoměru Wilson BH3000 společnosti Buehler (obr. 3.4.2). Jako indentor byla použita kulička z tvrdokovu o 5 mm při zatížení nominální zátěžovou silou $F = 2452 \text{ N}$ s dobou působení zkušebního zatížení 10 s. Hodnoty tvrdosti byly získány automatickým vyhodnocením vtisku pomocí kamery propojené s počítačem prostřednictvím softwaru Kingsman.

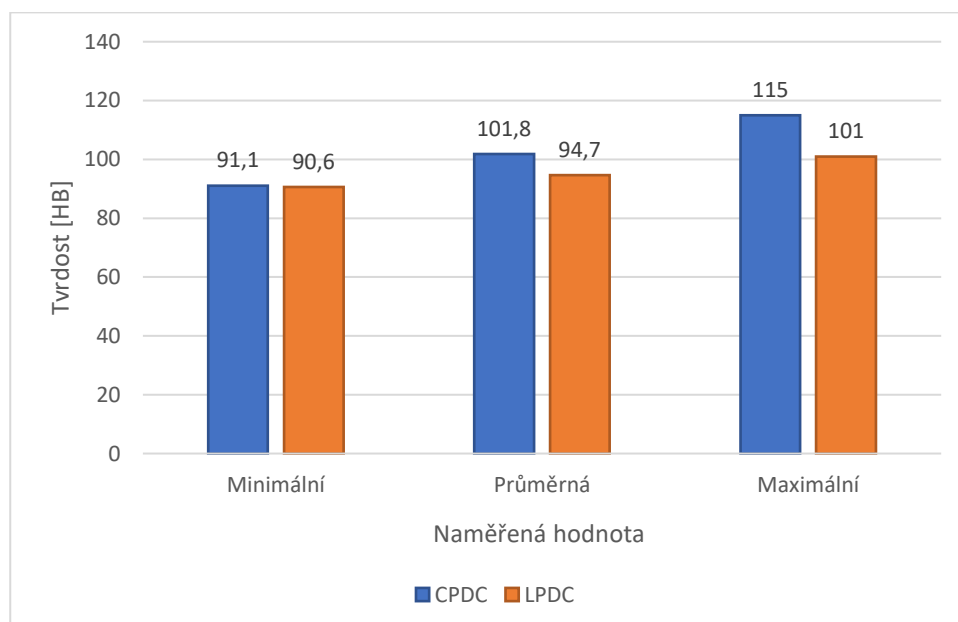


Obr. (3.4). 2 - Tvrdoměr Wilson Brinell Hardness 3000 (vlevo), detail vtisku (vpravo)

Tab. (3.4). 1 - Tabulka naměřených hodnot tvrdosti

Technologie výroby	Naměřená hodnota tvrdosti [HB]		
	Minimální	Průměrná	Maximální
CPDC	91,1	101,8	115,0
LPDC	90,6	94,7	101,0

Graf (3.4). 1 - Srovnání hodnot tvrdost



Srovnání průměrných naměřených hodnot: **101,8 HB** pro technologii CPDC a **94,7** pro LPDC ukazuje **7%** rozdíl ve prospěch technologie nízkotlakého lití s protitlakem.

3.4.2. Zkouška tahem

Tahové zkoušky byly provedeny na tyčích vysoustružených na CNC podle normy ČSN 42 0310 za pokojové teploty na elektronickém zkušebním stroji Hegewald&Peschke inspekt 50-1 table řízeném počítačem (obr. 3.4.3). Principem zkoušky je jednoosé zatěžování zkušební tyče v našem případě kruhového průřezu. Výstupem tahové zkoušky je grafické zobrazení závislost napětí σ a deformace ϵ , ze kterého software v počítači vygeneruje číselné hodnoty mechanických veličin.

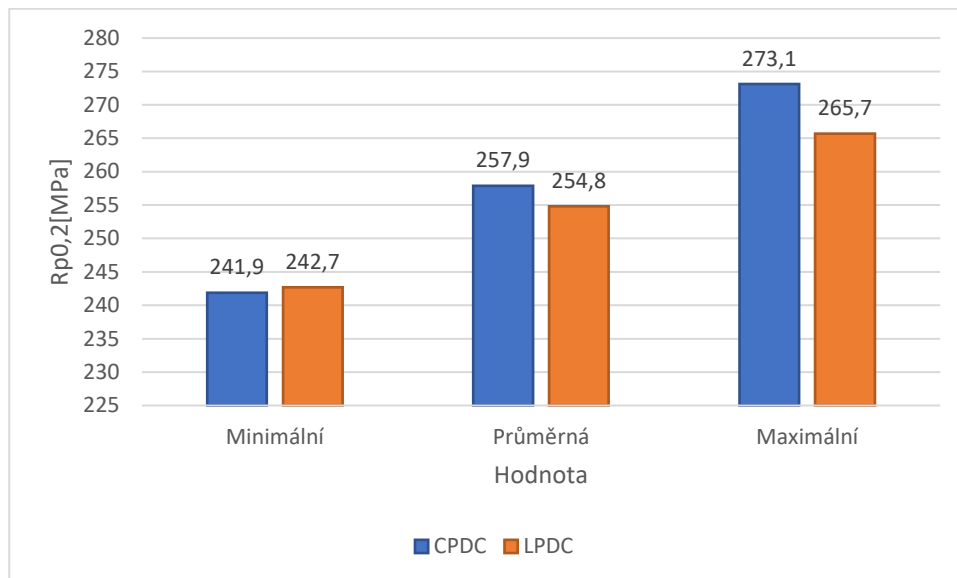


Obr. (3.4). 3 - Trhací zařízení Hegewald&Peschke inspekt 50-1 table

Tab. (3.4). 2 - Tabulka naměřených hodnot meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti

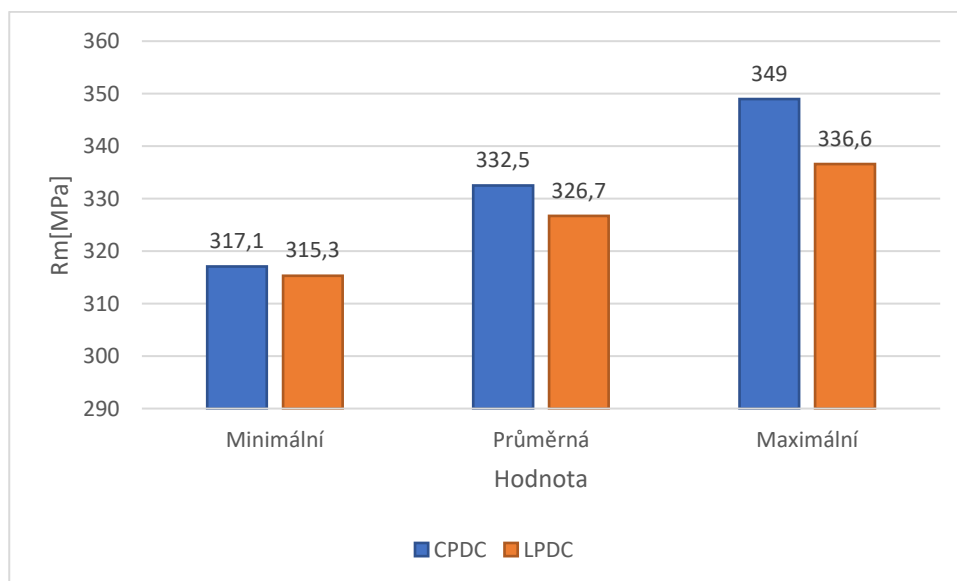
Technologie výroby	Hodnota	Rp0,2[MPa]	Rm[MPa]	A[%]
CPDC	Průměr	257,9	332,5	10,2
	Min	241,9	317,1	6,9
	Max	273,1	349,0	12,1
LPDC	Průměr	254,8	326,7	9,9
	Min	242,7	315,3	7,2
	Max	265,7	336,6	11,5

Graf (3.4). 2 - Srovnání hodnot meze kluzu



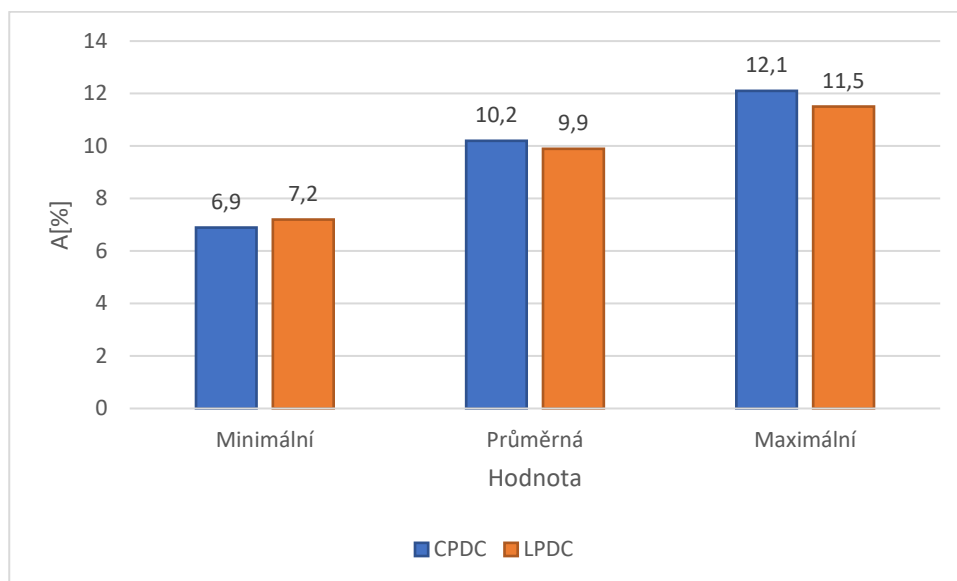
Srovnání průměrných naměřených hodnot meze kluzu [$R_{p0,2}$]: **257,9 MPa** pro technologii CPDC a **254,8 MPa** pro LPDC ukazuje 2 % rozdíl ve prospěch technologie nízkotlakého lití s protitlakem.

Graf (3.4). 3 - Srovnání hodnot meze pevnosti



Srovnání průměrných naměřených hodnot meze pevnosti [R_m]: **332,5 MPa** pro technologii CPDC a **326,7 MPa** pro LPDC ukazuje 1,7 % rozdíl ve prospěch technologie nízkotlakého lití s protitlakem.

Graf (3.4). 4 - Srovnání hodnot tažnosti



Srovnání průměrných naměřených hodnot tažnosti [A]: **10,2 %** pro technologii CPDC a **9,9 %** pro LPDC ukazuje **3 %** rozdíl ve prospěch technologie nízkotlakého lití s protitlakem.

3.5. Vyhodnocení analýzy mikrostrukturálních vlastností

Mikrostruktura byla vyhodnocena na základě 3 parametrů popsaných v kapitole (2.2) teoretické části:

- Vzdálenost sekundárních os dendritů (SDAS)
- Stupeň modifikace
- Velikost zrna

3.5.1. Metodika přípravy vzorků

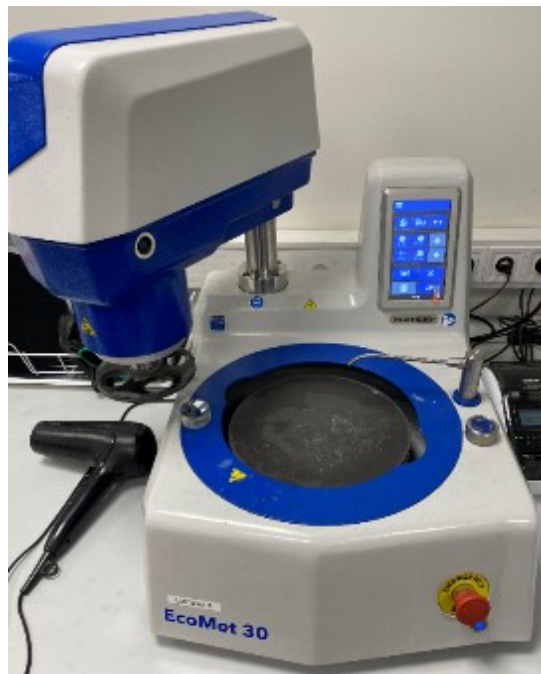
Z každého testovaného odlitku bylo odebráno 5 vzorků z 5ti míst definovaných zákazníkem prostřednictvím technické dokumentace označených 1-5. Vzorky byly následně zalisovány za tepla do průhledné lisovací hmoty Trans Optic s použitím automatického metalografického lisu SimpliMet 4000 společnosti Buehler. Odebrané vzorky z jednoho odlitku byly vždy zalisovány společně.



Obr. (3.5). 1 - Lisovací stroj BUEHLER SimpliMet 4000

Broušení a leštění bylo provedeno na univerzální brusce a leštičce s centrálním přitlakem ECOMet 30 rovněž od společnosti Buehler (obr. 3.5.1). Broušení vzorků probíhalo za použití brusných papírů zrnitosti 240, 600, 800, 1200, vždy v časovém intervalu 3 minut.

Následovalo leštění tkaninou TRIDent polishing cloth s diamantovou suspenzí MetaDi s velikostí zrna $3\mu\text{m}$ a MasterMet se velikostí zrna $1\mu\text{m}$ se smáčedlem MetaFluid vždy po dobu 3 minut. Následoval oplach vodou, oplach lihem a osušení povrchu horkovzdušnou pistolí.



Obr. (3.5). 2 - Bruska a leštička ECOMet 30

Popsaným postupem byly získány vzorky pro analýzu mikrostrukturálních vlastností.



Obr. (3.5). 3 - Zalisované metalografické vzorky

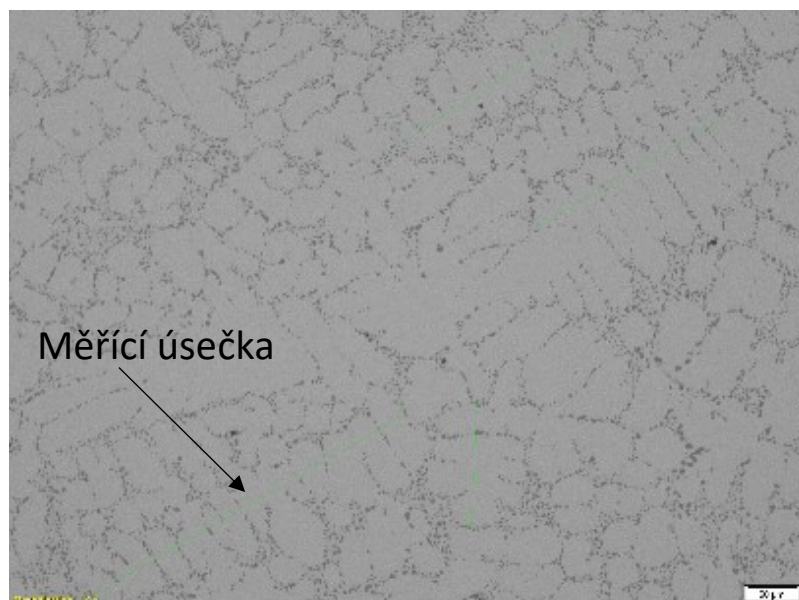
3.5.2. Vzdálenost sekundárních os dendritů (SDAS)

K pozorování a získání fotografické dokumentace byl použit optický metalografický mikroskop Nikon MA100N s digitální kamerou. Pro každý z pěti vzorků odebraných z vybraných zkušebních odlitků byl pořízen jeden reprezentativní snímek (při zvětšení 100×). Fotografie mikrostruktur byly ukládány a následně využity jako vstupní data pro obrazovou analýzu s pomocí softwaru Stream Motion.



Obr. (3.5). 4 - Mikroskop Nikon MA100N

Pro identifikaci a měření skupin sekundárních os dendritů pomocí obrazové analýzy bylo nutné na každém snímku sestavit měřicí úsečku a označit měřené dendrity. Hodnota vzdálenosti os dendritů byla automaticky stanovena podle vzorce $DAS = \frac{L}{n \cdot M}$, kde L je délka úsečky, M je použité zvětšení a n je počet sekundárních dendritů protnutých měřicí úsečkou.

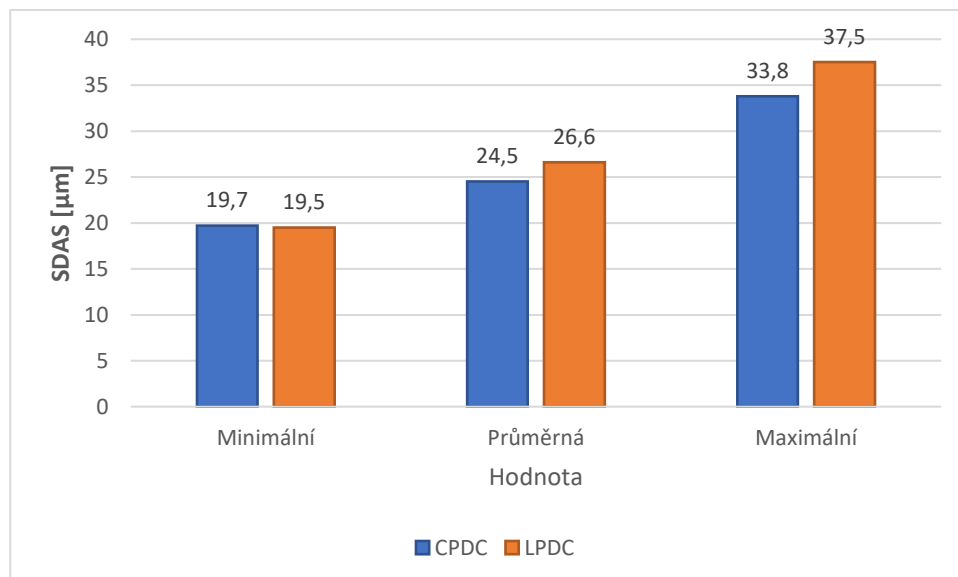


Obr. (3.5). 5 - Ukázka měření parametru DAS s využitím obrazové analýzy

Tab. (3.5). 1 - Tabulka naměřených hodnot SDAS

Technologie výroby	Naměřená hodnota SDAS [μm]		
	Minimální	Průměrná	Maximální
CPDC	19,7	24,5	33,8
LPDC	19,5	26,6	37,5

Graf (3.5). 1 - Srovnání hodnot SDAS



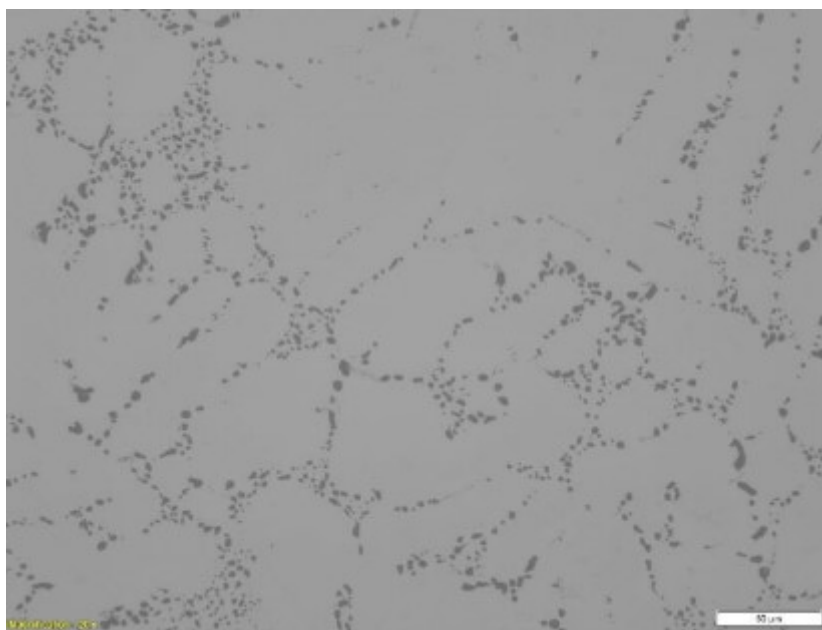
Srovnání průměrných naměřených hodnot SDAS: **24,5 μm** pro technologii CPDC a **26,6 μm** pro LPDC ukazuje **8 %** rozdíl ve prospěch technologie nízkotlakého lití s protitlakem.

3.5.3. Stupeň modifikace

Stupeň modifikace je ovlivněn chemickým složením, spíše než samotným způsobem odlévání, ale je v experimentální části uveden pro doplnění celkového obrazu kvality mikrostruktury.

Účinek modifikace byl vyhodnocen zároveň s SDAS. Průběh pořízení fotografií pro vyhodnocení probíhá stejným způsobem, jako pro vyhodnocení SDAS s rozdílem zvětšení, pro vyhodnocení účinku modifikace byl použit objektiv se zvětšením 20x, tudíž výsledná fotografie pro vyhodnocení má zvětšení 200x. Toto vyhodnocení probíhá pouze vizuálně (porovnávání snímků pořízených se vzorovými snímky) a je subjektivní.

Účinek modifikace se hodnotí číslem od 1 (nejhorší) do 5 (nejlepší). Hodnocení 1-3 znamená nedostatečný stupeň modifikace, 4-5 pak dostatečný.



Obr. (3.5). 6 - Ukázka snímku pro vyhodnocení stupně modifikace

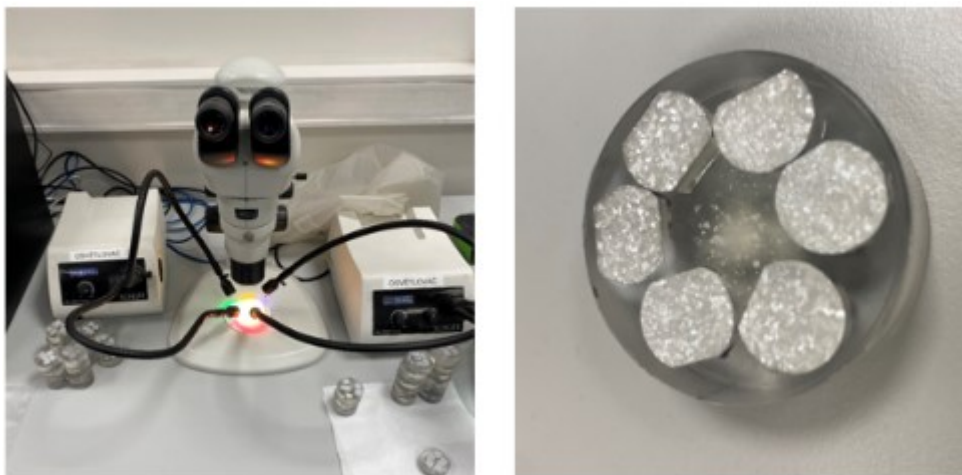
Jak vzorky **L**, tak vzorky **C** byly vyhodnoceny jako dostatečně modifikované, všechny byly ohodnoceny číslem 4, nebo lepším.

3.5.4. Velikost zrna

Analýza velikosti zrna je závěrečným krokem vyhodnocení mikrostrukturálních vlastností. Pro tuto analýzu byly použity stejné vzorky, na kterých byly v předchozích krocích vyhodnoceny SDAS a stupeň modifikace.

Příprava vzorků pro samotnou analýzu probíhala v ochranné digestoři. V prvním kroku byl vyleštěný povrch natřen roztokem dihydrátu $2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{CuCl}_2$ s vodou. Po natření povrch začne rychle reagovat. Ve druhém kroku byl povrch natřen koncentrovanou kyselinou HNO_3 . Ta způsobí zastavení předchozí reakce a zabrání další oxidaci povrchu.

V posledním kroku byl takto naleptaný a osušený vzorek umístěn do stereomikroskopu Nikon SMZ 800N, řízeného počítačem, ve kterém probíhá pořízení snímků pod dvěma osvětlovači SCHOTT KL1500HAL, které osvětlují vzorek RGB spektrem. Pořízené snímky exportuje automaticky software Quick Photo Camera 3.2.

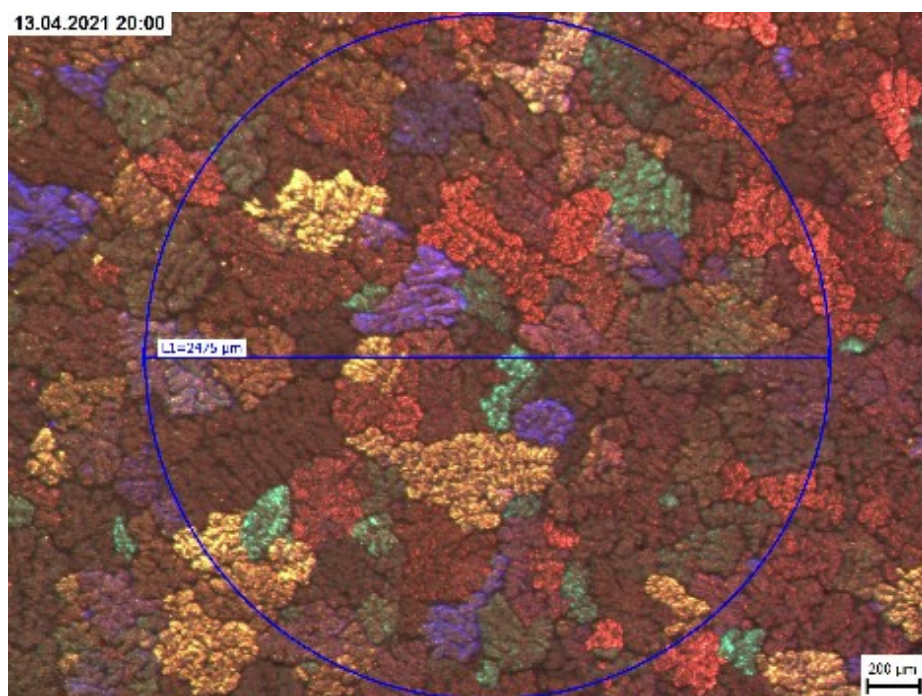


Obr. (3.5). 7 - Stereomikroskop Nikon SMZ 800N (vlevo), vyleptaný vzorek (vpravo)

Na vyexportovaných snímcích se v programu Quick Photo Camera sestrojí kružnice s průměrem $L_1 = 2475 \mu\text{m}$. Software automaticky vypočítá obvod této kružnice a počet hranic zrn, které kružnice protíná. Z těchto hodnot vypočítá průměrnou délku zrna. Na základě vypočítané hodnoty je možno z tabulky 3.5.2 vycházející z normy ASTM odečíst hodnotu délky zrna v mikronech, počet zrn na cm^2 , nebo vyjádřit hrubost slovně (jemná, střední, hrubá atd.).

Tab. (3.5). 2 - ASTM tabulka pro vyhodnocování hrubosti zrna

Hodnocení	Číslo velikosti zrna podle ASTM	Počet zrn na cm ²	Průměrná délka zrna	
			mm	mikrony
Velmi jemné	14.5	1550	0.23	225
Jemné	12.5	530	0.40	400
Střední	11.5	217	0.60	600
Velké	10.5	125	0.80	800
Hrubé	10.0	79	1.00	1000
Velmi hrubé	7.5	17	2.20	2200

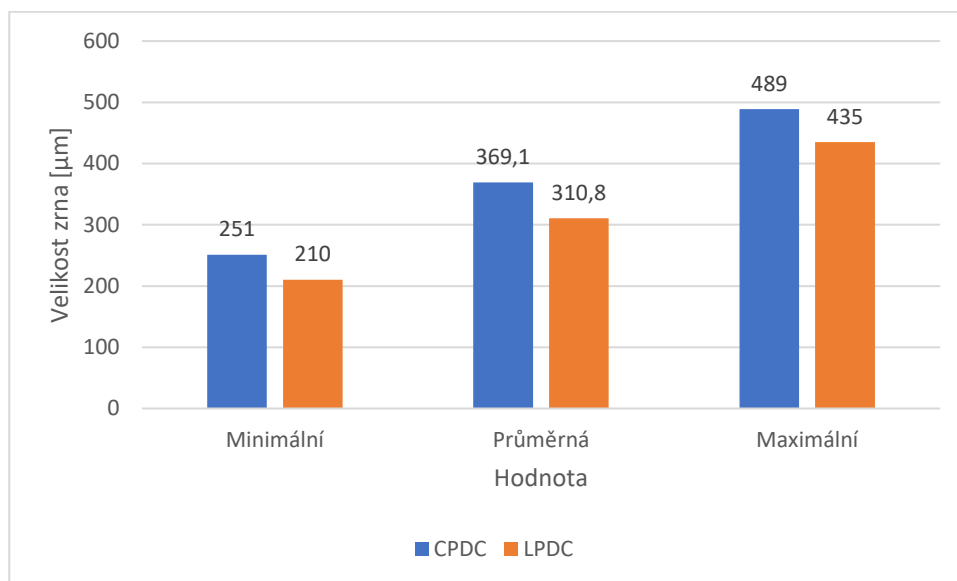


Obr. (3.5). 8 - Ukázka snímku pro vyhodnocení velikosti zrna

Tab. (3.5). 3 - Tabulka naměřených hodnot velikosti zrna

Technologie výroby	Hodnota velikosti zrna [μm]		
	Minimální	Průměrná	Maximální
CPDC	251,0	369,1	489,0
LPDC	210,0	310,8	435,0

Graf (3.5). 2 - Srovnání hodnot velikosti zrna



Srovnání průměrných naměřených hodnot velikosti zrna: **369,1 μm** pro technologii CPDC a **310,8 μm** pro LPDC ukazuje o **15,8 %** hrubší zrna u odlitků litých technologií CPDC.

3.6. Vyhodnocení chemické analýzy

Výsledky chemické analýzy slouží pouze jako referenční hodnoty, nejsou nijak ovlivněny způsobem odlévání. Jsou uvedeny pouze hlavní přísadové prvky popsané v teoretické části.

Tab. (3.6). 1 - Tabulka naměřených hodnot chemického složení

Technologie výroby	Hodnota	Si [%]	Ti [%]	Sr [%]	Mg [%]
CPDC	Průměr	7,07	0,117	0,0169	0,385
	Min	6,93	0,113	0,0165	0,369
	Max	7,15	0,122	0,0174	0,399
LPDC	Průměr	7,03	0,124	0,0178	0,382
	Min	6,88	0,118	0,0167	0,372
	Max	7,14	0,129	0,0187	0,392

3.7. Závěr

Cílem této práce bylo porovnání technologie tradičního nízkotlakého lití a nízkotlakého lití s protitlakem na odlitku se stejnou geometrií a vtokovou soustavou, při dodržení co nejpodobnějších provozních podmínek při výrobě, za použití stejných nástrojů prostřednictvím vyhodnocení vad a vlastností odlitků.

Na základě provedených experimentů je možno zformulovat následující závěry:

- Z výsledků radiologické zkoušky je patrné, že pokud má režim upraveného tlakování strojů CPC vliv na kvalitu těchto odlitků, jsou touto metodou testování nedetekovatelné, jinými slovy se od sebe neliší kvalita odlitků **C** a odlitků **L** na základě tohoto vyhodnocení, to stejné platí i pro výsledky fluorescenční zkoušky
- Všechny testované odlitky obou technologií byly vyhodnoceny jako dostatečně modifikované.
- Naměřené hodnoty tvrdosti ukazují **7 %** rozdíl ve prospěch technologie **CPDC**.
- Naměřené hodnoty meze kluzu ukazují **2 %** rozdíl ve prospěch technologie **CPDC**.
- Naměřené hodnoty meze pevnosti ukazují **1,7 %** rozdíl ve prospěch technologie **CPDC**.
- Naměřené hodnoty tažnosti ukazují **3 %** rozdíl ve prospěch technologie **CPDC**.
- Naměřené hodnoty SDAS ukazují **8 %** rozdíl ve prospěch technologie **CPDC**.
- Naměřené hodnoty velikosti zrna ukazují o **15,8 %** hrubší zrna u odlitků litých technologií CPDC.

Z tvrzení výše plyne, že v podstatě ve všech testech a analýzách prokázala technologie lití s protitlakem lepší výsledky, než technologie lití bez protitlaku. Rozdíly mechanických vlastností jsou velmi nízké, až zanedbatelné. Větší rozdíly jsou viditelné na mikrostruktuře odlitků – jednoznačně hrubší zrna mají odlitky vyrobené technologií lití s protitlakem a s tím souvisí i vyšší tvrdost těchto odlitků. Avšak i s hrubozrnější strukturou si zachovaly odlitky lité s protitlakem vyšší hodnoty mechanických vlastností.

Výsledky těchto testů jsou spojeny právě s identickou geometrií i procesním zpracováním porovnávaných odlitků. Při porovnání stejných technologií na odlitcích s jinou geometrií, či vtokovou soustavou se dá očekávat velmi odlišný výsledek.

Seznam použité literatury

1. MICHNA, Š. a kol.: Encyklopedie hliníku, Adin Prešov, (2005)
2. PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, c2002. ISBN 80-7204-248-3.
3. ROUČKA, Jaromír. Metalurgie neželezných slitin. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2790-6.
4. SLOVÁK, Stanislav a Karel RUSÍN. Teorie slévání. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1990.
5. A.C. STREET, The diecasting book – 2nd edition, Portcullis Press (1990)
6. ASM Metals Handbook, 10th ed., vol. 15: "Casting", ASM - Metals Park, Ohio (1990).
7. CAMPBELL J., R. A. HARDING, "Casting Technology" in TALAT 2.0 cd-rom, EAA, Bruxelles (2000).
8. CAMPBELL J., "Castings", Butterworth, Oxford (1991).
9. BONOLLO F., "Gravity and Low pressure die casting of aluminium alloys: A technical and economical benchmark", University of Padova, 2005
10. BARRY J., PATTERSON D., "Pressure Counter Pressure Casting (PCPC) for Automotive Aluminum Structural Components", Intermet Stevensville Plant, 2001
11. WURKER, L., ZEUNER T., "Aluminium chassis parts produced by counter pressure casting", Hildesheim, 2006
12. ELBEL, T. 1992. Vady odlitků ze slitin železa: Klasifikace, příčiny a prevence. Brno: Matecs.
13. KOVVI, K. G., V. M. PLJACKIJ a František VESELÝ. Vady odlitků ze slitin neželezných kovů. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1956.
14. J. CAMPBELL a R. A. HARDING, "Solidification Defects in Castings", The University of Birmingham, 1994
15. HANUMANTHA RAO, D., G. R. N. TAGORE a G. RANGA JANARDHANA. Evolution of Artificial Neural Network (ANN) model for predicting secondary dendrite arm spacing in aluminium alloy casting. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering [online]. 2010, 32(3) [cit. 2017-05-21]. ISSN 1678-5878.
16. VOJTĚCH, Dalibor. Kovové materiály. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
17. ZHANG, B., M. GARRO a C. TAGLIANO. Dendrite arm spacing in aluminum alloy cylinder heads produced by gravity semi-permanent mold. Metallurgical science and technology [online]. 2003, 21(1), 1-8 [cit. 2017-05-21].
18. EL SEBAIE, O., A.M. SAMUEL, F.H. SAMUEL a H.W. DOTY. The effects of mischmetal, cooling rate and heat treatment on the hardness of A319.1, A356.2 and A413.1 Al-Si casting alloys.
19. KLOCOVÁ, Petra. Hodnocení porezity u odlitků tlakově litých z Al slitin. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 66s., příloh. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.
20. JEONG, C. Y., C.-S. KANG, J.-I. CHO, I.-H. OH a Y.-C. KIM. Effect of microstructure on mechanical properties for A356 casting alloy. International Journal of Cast Metals Research.
21. KYSELKA, Štefan. Vady odlitků: příčiny vzniku a doporučený postup k jejich odstranění. Poříčany: BENEŠ a LÁT a.s., 2015. 55

Seznam použitých zkratek

LPDC - low pressure die casting - nízkotlaké lití

CPDC - counter pressure die casting - nízkotlaké lití s protitlakem

CPC – counter pressure caster – lící stroj pro nízkotlaké lití s protitlakem

KPC – krystalická plošně centrovaná mřížka

USAMPAMD - USA Automotive Materials Partnership – Automotive Materials Division

ADR - Automatic Defect Recognition – software využívaný rentgenovým zařízením

SDAS – Secondary dendrite arm spacing – vzdálenost sekundárních os dendritů.

RGB – Red, green, blue – barevné spektrum

NDT – Non destructive testing - Nedestruktivní testování

Seznam obrázků

Kapitola 2.1

Obr. (2.1). 1 - Rovnovážný diagram Al-Si [1].....	4
Obr. (2.1). 2 - fázový diagram systému hliník – titan [1]	6
Obr. (2.1). 3 - Fázový diagram systému Al – Sr [1]	7
Obr. (2.1). 4 - Fázový diagram systému Al – Mg [1]	8
Obr. (2.1). 5 - Vliv obsahu hořčíku na mech. vlastnosti slitiny AlSi9Mg po vytvrzení [3] ..	9

Kapitola 2.2

Obr. (2.2). 1 - Dendrit [15].....	12
Obr. (2.2). 2 - Základní strukturní elementy v podeutektické slitině [3]	13
Obr. (2.2). 3 - Závislost mechanických vlastností slitin na DAS [3].....	14
Obr. (2.2). 4 - Měření DAS [3]	15
Obr. (2.2). 5 - Souvislost morfologie tuhé fáze s velikostí koncentračního přechlazení [3]16	

Kapitola 2.3

Obr. (2.3). 1 - Schéma žíhacího cyklu [1].....	18
Obr. (2.3). 2 - křivka kinetiky rozpadu slitin Al-Mg-Si pro přirozené stárnutí [1].....	20
Obr. (2.3). 3 - křivka kinetiky rozpadu slitin Al-Mg-Si pro umělé stárnutí [1].....	20

Kapitola 2.4

Obr. (2.4). 1 - obecné schéma licího stroje nízkotlakého lití [10]	21
--	----

Kapitola 2.5

Obr. (2.5). 1 - Softwarová predikce výskytu hot spotů.....	25
Obr. (2.5). 2 - Softwarová predikce výskytu staženin	25
Obr. (2.5). 3 - Softwarová modelace chladicího systému	25
Obr. (2.5). 4 - Tavicí pec StrikoWestofen GmbH MH II(RD)-N 6000/400 G-eg.....	26
Obr. (2.5). 5 - Odplyňovací zařízení	27
Obr. (2.5). 6 - Průběh K-MOLD zkoušky.....	28
Obr. (2.5). 7 - Etalon vzorků K-MOLD	28
Obr. (2.5). 8 - Průběh RTP zkoušky	29
Obr. (2.5). 9 - Vzorek pro vyhodnocení RTP testu.....	29
Obr. (2.5). 10 - Etalon vzorků RTP.....	30
Obr. (2.5). 11 - Schéma licího CPC stroje [11].....	31
Obr. (2.5). 12 - schéma procesu CPDC [10]	32
Obr. (2.5). 13 - Licí stroj CPC 1600	33
Obr. (2.5). 14 - Křivky tlaku během licího cyklu [11].....	34
Obr. (2.5). 15 - Laserovací zařízení	35
Obr. (2.5). 16 - Střížník.....	35
Obr. (2.5). 17 - Automatická pila.....	36
Obr. (2.5). 18 - Modelové zobrazení směru řezu	36
Obr. (2.5). 19 - Schéma žíhací pece	37
Obr. (2.5). 20 - Žíhací pec.....	37

Kapitola 2.6

Obr. (2.6). 1 – Rentgenový snímek plynové bubliny.....	39
Obr. (2.6). 2 - Vliv teploty na rozpustnost vodíku v hliníku a ve slitinách Al-Si [12]	39
Obr. (2.6). 3 - Rentgenový snímek staženiny	42
Obr. (2.6). 4 - Povrchová propadlina	44
Obr. (2.6). 5 – Snímek povrchové trhliny indikované fluorescenční zkouškou	45
Obr. (2.6). 6 - Pohled na povrch vnitřní trhliny pomocí elektronového mikroskopu [14] ..	46
Obr. (2.6). 7 - Prasklina.....	46
Obr. (2.6). 8 - Schéma vady – mikrostaženiny, mikrobubliny, mikrotrhliny [12].....	47
Obr. (2.6). 9 - Schéma vady – vměstky [12].....	48

Obr. (2.6). 10 - Schéma vady – nesprávná velikost zrna [12].....	48
Kapitola 2.7	
Obr. (2.7). 1 - Odlitek nasprejovaný fluorescenční kapalinou pod denním světlem (vlevo) a pod ultrafialovým světlem (vpravo).....	52
Obr. (2.7). 2 - Tahový diagram	55
Kapitola 3.0	
Obr. (3.0). 1 - Model porovnávaného odlitku	56
Kapitola 3.1	
Obr. (3.1). 1 - Odlitek použitý pro srovnání	56
Obr. (3.1). 2 - Spodní část formy	57
Kapitola 3.2	
Obr. (3.2). 1 - Vzorek pro vyhodnocení K-MOLD testu	58
Obr. (3.2). 2 - Vzorek pro vyhodnocení RTP testu	58
Kapitola 3.3	
Obr. (3.3). 1 - Rentgenové zařízení OMNIA 160-100.....	59
Obr. (3.3). 2 - Rentgenové snímky odlitků C (vlevo) a L (vpravo)	60
Kapitola 3.4	
Obr. (3.4). 1 - Rozmístění testovacích kusů v žíhacím koši	62
Obr. (3.4). 2 - Tvrdoměr Wilson Brinell Hardness 3000 (vlevo), detail vtisku (vpravo)	63
Obr. (3.4). 3 - Trhací zařízení Hegewald&Peschke inspekt 50-1 table	64
Kapitola 3.5	
Obr. (3.5). 1 - Lisovací stroj BUEHLER SimpliMet 4000	67
Obr. (3.5). 2 - Bruska a leštička ECOMet 30.....	68
Obr. (3.5). 3 - Zalisované metalografické vzorky	68
Obr. (3.5). 4 - Mikroskop Nikon MA100N.....	69
Obr. (3.5). 5 - Ukázka měření parametru DAS s využitím obrazové analýzy	70
Obr. (3.5). 6 - Ukázka snímku pro vyhodnocení stupně modifikace	71
Obr. (3.5). 7 - Stereomikroskop Nikon SMZ 800N (vlevo), vyleptaný vzorek (vpravo)	72
Obr. (3.5). 8 - Ukázka snímku pro vyhodnocení velikosti zrna.....	73

Seznam tabulek

Kapitola 2.1

Tab. (2.1). 1 - Značení slitin hliníku dle ČSN EN 1706 [3].....3

Tab. (2.1). 2 - Chemické složení slitiny [5]10

Tab. (2.1). 3 - Mechanické vlastnosti slitiny [5]10

Kapitola 2.5

Tab. (2.5). 1 - Parametry tavící pece.....26

Kapitola 3.3

Tab. (3.3). 1 - Tabulka výsledků rentgenové zkoušky60

Tab. (3.3). 2 - Tabulka výsledků fluorescenční zkoušky61

Kapitola 3.4

Tab. (3.4). 1 - Tabulka naměřených hodnot tvrdosti63

Tab. (3.4). 2 - Tabulka naměřených hodnot meze kluzu, meze pevnosti a tažnosti64

Kapitola 3.5

Tab. (3.5). 1 - Tabulka naměřených hodnot SDAS70

Tab. (3.5). 2 - ASTM tabulka pro vyhodnocování hrubosti zrna.....73

Tab. (3.5). 3 - Tabulka naměřených hodnot velikosti zrna73

Kapitola 3.6

Tab. (3.6). 1 - Tabulka naměřených hodnot chemického složení74

Seznam grafů

Kapitola 3.4

Graf (3.4). 1 - Srovnání hodnot tvrdosti.....	63
Graf (3.4). 2 - Srovnání hodnot meze kluzu	65
Graf (3.4). 3 - Srovnání hodnot meze pevnosti.....	65
Graf (3.4). 4 - Srovnání hodnot tažnosti	66

Kapitola 3.5

Graf (3.5). 1 - Srovnání hodnot SDAS.....	70
Graf (3.5). 2 - Srovnání hodnot velikosti zrna	74